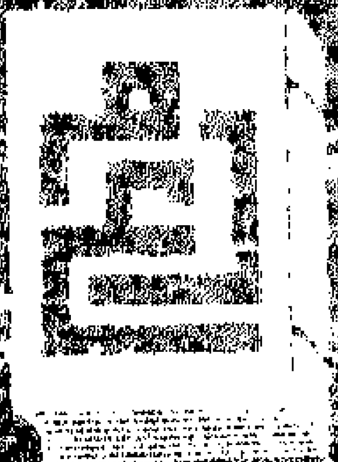


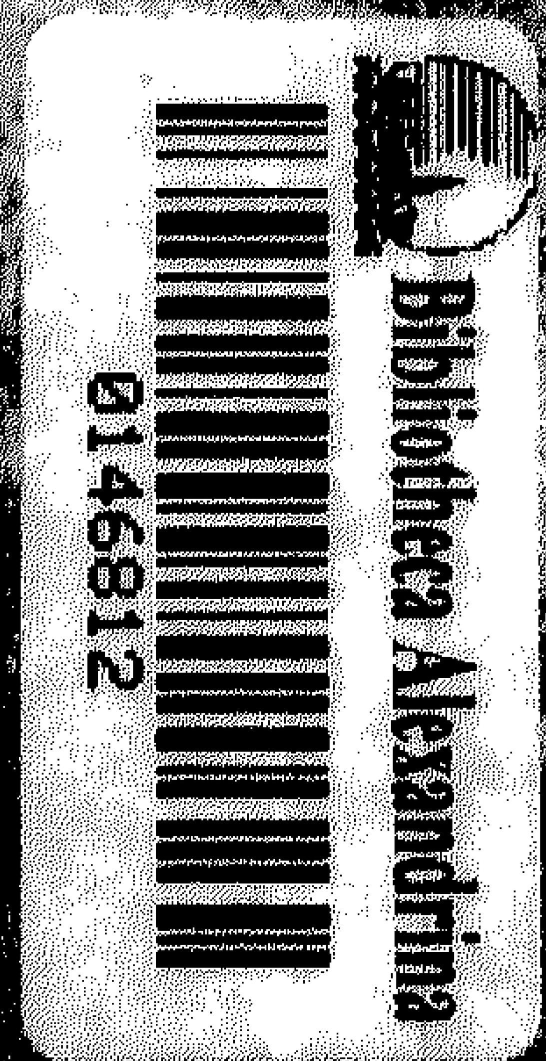
ألبرت آينشتاين

النسبية

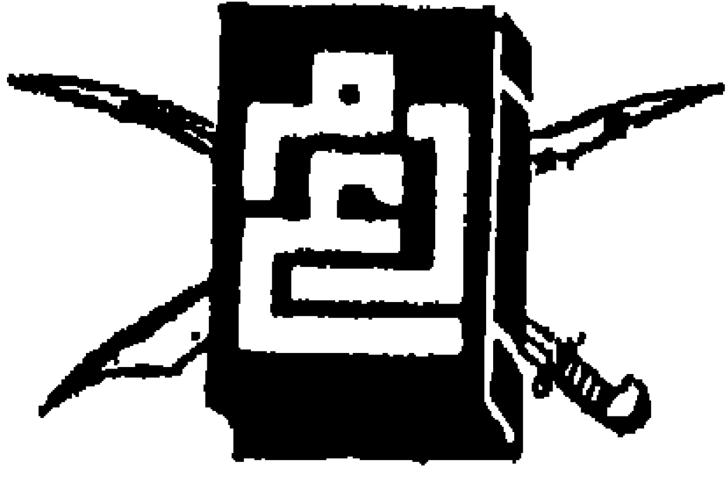
النظرية الخاصة والنظرية العامة

ترجمة :
د. أدهم السمان

مركز الدراسات العسكرية
دمشق ١٩٨٥



ألبرت آينشتاين



النسبيّة

النظريّة الخاصّة والنظريّة العامّة

ترجمة
الدكتور أدهم السمّان

مركز الدّراسات العسكريّة

دمشق ــ ١٩٨٥

تقديم

بناء على توجيهات السيد العماد نائب القائد العام ـ نائب رئيس مجلس الوزراء ـ وزير الدفاع ، قام مركز الدراسات العسكرية بترجمة كتاب « النسبية » الذي وضعه ألبرت آينشتاين صاحب النظرية نفسه ، لعرض مبادىء نظرية النسبية الخاصة والعامة في ناحيتيها العلمية والفلسفية بأسلوب مبسط مما يجعله في متناول فهم القارىء العادي غير المتخصص . فالمعروف ان نظرية النسبية تكشف عن الخواص الفيزيائية والرياضيةللعالم المحيط بنا ، تلك الخواص التي لايمكن ملاحظتها عند دراسة الكون دراسة أولية ، اعتمادا على مبادىء الفيزياء الكلاسيكية (الاتباعية) .

ونظرية النسبية تعمق المفاهيم والتصورات التي كونتها العلوم الاتباعية المستندة الى مفاهيم الهندسة الاقليدية ، وتعين الحدود التي يمكن ، في نطاقها ، استخدام هذه المفاهيم كي لاتؤدي الى نتائج غير صحيحة .

مركز الدراسات العسكرية

مقدمة

يهدف هذا الكتاب ، بقدر الامكان الى اعطاء صورة داخلية دقيقةلنظرية النسبية ، لتلك الفئة من القراء الذين يهتمــون بهذه النظرية ، في ناحيتيها العلمية والفلسفيــة ، ولكنهم لايملكون الزاد الرياضي والفيزيائي النظــري الكافي . وهذا العمل يفترض توفر مستوى من الثقافة يوازي مستوى امتحان القبول في الجامعة ، وهو ، برغم صغر الكتاب ، يتطلب من القارىء قدرا من الصبر وقوة الارادة . ولم يدخر المؤلف ، في مهمته هذه ، جهدا في عــرض الافكار الرئيسية بالاسلوب الابسط والاقرب للفهم ، وبصورة عامة ، في النواحي التي تتصل بواقع منشئها . وبسبب اهتمامي بالوضوح ، فقد بدأ لي من غير الممكن تجنب أن أكرر أفكاري مرارا عديدة ، دون ان اعير أناقــة العرض أقل اهتمام . ولقد التزمت ، بكل حرص ، بآراء الفيزيائي النظري اللامع ، ل. بولتزمان L . BOLTZMAN ، الذي يقول بأن اناقة العرض يجب ان تترك للخياط وللحذاء . وأنا لا أدعي بأنني قد حجبت عن القارىء الصعوبات التي تتصل بالموضوع . ومن ناحية أخرى تعمدت أن اعالج الاسس العملية للنظرية بأسلوب « زوجة الاب (١) » بحيث لايتملك القارىء اللامتمرس بالفيزياء شعور المتسكع العاجز عن رؤية الغابة بسبب أشجارها . فهل سيقدر هذا الكتاب على ان يوفر للقارىء بضع ساعات من التفكير الابداعي .

كانون الاول (ديسمبر) ، ١٩١٦

أ . آينشتاين

---

(١) ـ تعبير استخدمه الكاتب ليعني به الاسلوب المبسط .

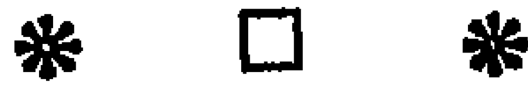
ملاحظة على الطبعة الخامسة عشرة

لقد اضفت ، في هذه الطبعة ، كملحق خامس ، عرضا لآرائي حول المكان بصورة عامة وحول التعديلات التدريجية التي طرات على افكارنا عن المكان كنتيجة لتأثير وجهة النظر النسبوية . وقد استهدفت ان اثبت ان المكان ـ الزمان ليس بالضرورة شيئا يمكن ان نمنحه وجودا منفصلا ، بصورة مستقلة عن الاغراض الفعلية للواقع الفيزيائي .

فالاشيــاء الفيزيائيــة ليست **في المكان** ، لكن هذه الاشيــاء هي **ذات امتداد مكاني** . وبهذا المعنى يفقد مفهوم « المكان الخالي » محتواه .

٩ حزيران (يونيو) ، ١٩٥٢

ا . آينشتاين



القِسمُ الأوّل

نظرية النسبيّة الخاصّة

١ ـ المعنى الفيزيائي للمقولات الهندسية .

لقد تعرف معظمكم ، انتم قراء هذا الكتاب ، أثناء مرحلة حياتكم المدرسية على البناء الشامخ لهندسة اقليدس ، وتتذكرون ـ وربما بشعور احترام اكثر منه شعور حب ـ البنية الرائعة التي كان يدفعكم الى تسنم درجها أساتذة شرفاء خلال ساعات وساعات . ولا ريب أنكم ، بدافع من خبرتكم الماضية ، تنظرون بازدراء الى كل من يحاول ان ينبس بكلمة تعارض أقل المقولات شأنا في هذا العلم . وربما راح شعور الفخار الواثق هذا يزول عنكم بمجرد ان يطرح أحد الناس عليكم السؤال التالي : « ماذا تعنون بادعائكم ان هذه المقولات صحيحة ؟ » دعونا نحاول ان نعطي لهذه المسألة بعض الاهتمام .

ان علم الهندسة ينبثق من بعض المفاهيم مثل « مستوي » و « نقطة » و « خط مستقيم » والتي نستطيع ان نعلق بها أفكارا جيدة التحديد أو رديئته ، كما ينبثق من خلال مقولات (مسلمات) بسيطة ننزع الى القبول بها ك « حقيقة » ، استنادا الى تلك الافكار . وعندئذ وبنتيجة تسلسل منطقي يبرره شعورنا بأن لابد من القبول به ، يتضح لنا ان المقولات الاخرى تنبع من هذه المسلمات ، أي تتبرهن بواسطتها . فالمقولة تصبح اذن صحيحة(«حقيقية») عندما يمكن اشتقاقها من المسلمات بالطريقة المعتمدة . فمسألة « حقيقة » المقولة الهندسية المفردة تنحصر عندئذ في « حقيقة » احدى تلك المسلمات . والآن أصبحنا نعلم ان الطرائق الهندسية لاتتيح أي جواب عن السؤال المطروح أعلاه ، وليس هذا فحسب ، بل ان ذلك السؤال نفسه عديم المعنى تماما . فنحن لانستطيع ان نتساءل عن حقيقة فيما اذا كان يمر خط مستقيم واحد من نقطتين . بل نستطيع فقط ان نقول ان الهندسة الاقليدية تتعامل مع

اشياء تسمى « خطوطا مستقيمة » يتمتع كل منها حصرا بخاصة ان يتعين بنقطتين فقط تقعان عليه . فمفهوم الـ « حقيقة » لايتوقف على مزاعم الهندسة البحتة ، لاننا اعتدنا عمليا على ان نعني دوما بكلمة « حقيقة » العلاقة بفرض « واقعي » ، وعلم الهندسة ، على كل حال ، لايهتم بالعلاقة بين الافكار الواردة فيه وبين اغراض التجربة ، لكنه يهتم حصرا بالارتباط المنطقي فيما بين هذه الافكار نفسها .

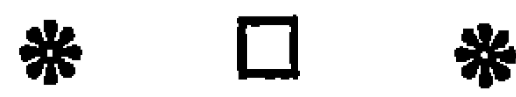
وليس من الصعب ان نفهم لماذا ، وبرغم كل ذلك ، نشعر باننا مضطرون لنعت مقولات الهندسة بـ « الحقيقية » . فالافكار الهندسية تتعلق ، بدرجات متفاوتة من الصحة ، بالاشياء الموجودة في الطبيعة ، وهذه الاشياء هي بلا شك السبب الوحيد في نشوء هذه الافكار . ويجب على الهندسة ان تمتنع عن سلوك مثل هذا الطريق كي تعطي لبنيتها أوسع وحدة منطقية ممكنة . فالاعتياد مثلا على ان نرى في « المسافة » اشارتين مرسومتين على قضيب صلب هو شيء مترسخ في اعماق أسلوب تفكيرنا . ونحن فوق ذلك اعتدنا على ان نعتبر ان ثلاث نقط تقع على خط مستقيم ، اذا كانت مواضعها الظاهرية يمكن ان تتطابق عندما ننظر اليها بعين واحدة بعد ان نحسن اختيار المكان الذي ننظر اليها منه .

واذا اتممنا الآن ، متبعين عادتنا في التفكير ، مقولات الهندسة الاقليدية بمقولة تفيد بأن نقطتين من جسم صلب عمليا تعينان المسافة نفسها (المجال الخطي) مهما طرأ على هذا الجسم من تغيرات في وضعه ، فان مقولات الهندسة الاقليدية تتحلل من تلقاء نفسها الى مقولات تخص الوضع النسبي للاجسام الصلبة عمليا (١) . ان علم الهندسة المتمم بهذه الطريقة يعالج عندئذ كفرع من الفيزياء . ونستطيع الآن بحق ان نسأل عن « حقيقة » المقولات الهندسية

(١) — ينتج من ذلك ان الاجسام الطبيعية تقترن أيضا بالخط المستقيم . فالنقاط الثلاث C , B , A من جسم صلب ، تصبح واقعة على خط مستقيم اذا اخترنا ، بعد معرفة مكاني C , A مكان B بحيث يكون مجموع المسافتين CB , AB اصغر ما يمكن . إن هذه الاشارة المجتزاة كافية للاستمرار في موضوع حديثنا .

المفهومة بهذا المعنى ، طالما وجدنا المبرر لان نسأل فيما اذا كانت هذه المقولات محققة من اجل تلك الاشياء الواقعية التي ربطناها بالافكار الهندسية . وبتعبير اقل دقة يمكن ان نصوغ ذلك بقولنا اننا نقصد ب « حقيقة » المقولة الهندسية ، المأخوذة بهذا المعنى ، صلاحية استخدامها للرسم بالمسطرة والفرجار .

هذا وان اليقين ب « حقيقة » المقولات الهندسية المفهومة بهذا المعنى يستند ، بالطبع وحصرا ، على خبرة ناقصة نوعا ما . ونحن ، في الوقت الحاضر ، نتقبل « حقيقة » المقولات الهندسية ، على أننا سنرى في مرحلة لاحقة (في نظرية النسبية العامة) ان هذه « الحقيقة » محدودة وسنعالج عندئذ مدى محدوديتها .



٢ ـ جملة الإحداثيات

بالاستناد الى ذلك التفسير الفيزيائي للمسافة الذي شرحناه آنفا اصبحنا في وضع يمكننا من تعيين المسافة بين نقطتين على جسم صلب بعمليات قياس . ومن اجل هذا نحتاج الى « مسافة » (قضيب S) نستخدمها في كل مرة ونتخذها كعيار قياسي . فاذا كنا الآن ازاء نقطتين B , A على جسم صلب ، امكننا ان ننشىء الخط الذي يصل بينهما وفق قواعد الهندسة ، فانطلاقا من A يمكن ان نعين عدد المسافات S ، مرحلة بعد مرحلة ، حتى نصل الى B . فعدد العمليات المرحلية التي استلزمها هذا الاجراء هو القياس العددي للمسافة AB . ذلك هو أساس كل قياس للطول (١) .

ان كل توصيف لمسرح أي حادث ، أو أي وضع لغرض في الفضاء (٢) ، يعتمد على تحديد تلك النقطة من الجسم الصلب التي انطبق عليها الحادث أو الغرض . وهذا القول لاينطبق على التوصيف العلمي فحسب بل ينسحب أيضا على توصيف وقائع الحياة اليومية . فاذا أمعنت النظر في تعيين الموضع: « ساحة الامويين ، دمشق »(٣) ، أتوصل الى النتيجة التالية :

ان الارض هي الجسم الصلب الذي أنسب اليه تعيين الموضع ، وان

---

(١) ـ لقد افترضنا هنا انه لم تبق اية قطعة من هذه المسافة أي ان عملية القياس تعطي عددا صحيحا . وهذه الصعوبة يمكن تخطيها باستخدام قضبان ـ قياسية مقسمة لايتطلب استعمالها اية طريقة جديدة تختلف اساسيا عما نقوم به .

(٢) ـ ان كلمة Space الاجنبية تقابل في العربية كلمتي « مكان » و « فضاء » ، وسنختار من هاتين الكلمتين ماتراه مناسبا لمقتضى المعنى . (المترجم) .

(٣) ـ لقد اخترنا هذا المكان كي يكون مألوفا للقراء العرب ، بدلا من « ساحة الطرف الاغر ، لندن » الوارد في طبعة الكتاب التي بين أيدينا . (المترجم) .

« ساحة الامويين ، دمشق » هي نقطة محددة تماما كان قد اعطي اسم لها وينطبق الحادث مكانيا عليها (١) .

فالطريقة البدائية في تعيين المحل تتناول حصرا المحلات الواقعة على سطح جسم صلب ، كما تتوقف على وجود نقاط على هذا السطح يمكن تمييز كل نقطة منها عن الاخريات . لكننا نستطيع ان نتحرر من هذين الحصرين كليهما دون ان نغير طبيعة طريقتنا في تعيين الموضع . فاذا كنا ، مثلا ، ازاء غيمة تحلق فوق ساحة الامويين ، فاننا نستطيع ان نعين موضعها بالنسبة لسطح الارض وذلك بانشاء عمود وفق شاقول الساحة حتى يصل الى الغيمة . ان طول هذا العمود مقيسا بقضيب القياس العياري ، بالاضافة الى تعيين موطىء قدم العمود ، يزودنا بتعيين تام لموضع الغيمة . وعلى اساس هذا المثال العملي يمكن ان نفهم الطريقة التي امكن بواسطتها تطوير التدقيق في مفهوم الموضع .

آ ـ نتخيل جسما صلبا ، ننسب اليه تعيين الموضع ، ونتممه بحيث يتاح له ان يصل الى الغرض الذي نود تعيين موضعه به .

ب ـ في تحديد موضع الغرض ، نلجأ لاستعمال عدد (هو هنا طول العمود مقيسا بقضيب القياس العياري) بدلا من نقاط معينة ننسب اليها الموضع .

ج ـ نتكلم عن علو الغيمة حتى ولو لم ننشىء العمود الذي يصل اليها .

فعن طريق الرصد الضوئي للغيمة من مواضع مختلفة على الارض ،وبعد ان نأخذ بعين الاعتبار خواص انتشار الضوء ، نعين طول العمود الذي يجب انشاؤه ليصل الى الغيمة .

ومن خلال هذا التحليل نرى اننا نستفيد كثيرا ، في سبيل توصيف الموضع ، اذا اتيح لنا ، بقياس عددي ، ان نستغني عن العلامات الموضعية

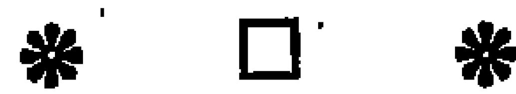
(١) ـ ليس من الضروري هنا ان نذقق اكثر من ذلك في معنى الجملة « انطباق في المكان » لان مدلولها واضح بما يكفي ليجعل تفاوت الآراء حوله غير ذي اهمية في صحة استعماله .

(أسماء العلم) على الجسم الصلب الذي ننسب اليه . وفي علم القياس الفيزيائي يتاح لنا هذا بالاعتماد على جملة الاحداثيات الديكارتية .

تتألف جملة الاحداثيات هذه من ثلاثة مستويات متعامدة ومربوطة ربطا محكما بجسم صلب . فبالنسبة لهذه الجملة يتحدد مسرح أي حادث (المنطقة الرئيسية منه) بتعيين أطوال الاعمدة الثلاثة ، أي الاحداثيات (Z , Y , X) ، التي يمكن اسقاطها من مسرح الحادث على هذه السطوح المستوية الثلاثة . واطوال هذه الاعمدة الثلاثة تقاس بسلسلة من العمليات تستخدم قضبان قياس صلبة ، وفق القواعد والطرق الشائعة في الهندسة الاقليدية .

ان السطوح الصلبة ، التي تتالف منها جملة الاحداثيات ، ليست عمليا بالاشياء التي يمكن الحصول عليها . وبالاضافة لذلك ، فان قيم الاحداثيات لاتقاس عمليا بصنع قضبان صلبة ، بل بطرائق غير مباشرة . ولئن كانت نتائج علمي الفيزياء والفلك تحتفظ بوضوحها فان المعنى الفيزيائي يجب دوما ان يكون على وفاق مع الاعتبارات المذكورة آنفا (١) .

وهكذا نصل الى النتيجة التالية : ان كل توصيف للحوادث في المكان يتطلب استعمال جسم صلب ننسب الحوادث اليه . كما ان العلاقة الناتجة عن ذلك تتضمن ان قوانين الهندسة الاقليدية تظل صحيحة من أجل « المسافات » ، علما بأن « المسافة » تتمثل فيزيائيا بواسطة اصطلاح العلامتين على الجسم الصلب .



(١) ـ ان التدقيق في هذه الصورة وفي تعديلها لن يكون ضروريا قبل ان نعالج نظرية النسبية العامة في القسم الثاني من هذا الكتاب .

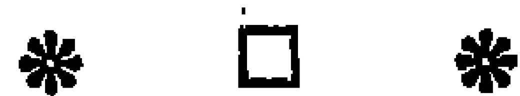
٣ ـ المكان والزمان في الميكانيك التقليدي

ان علم الميكانيك يهتم بكيفية تغير أوضاع الاجسام في المكان بمرور الزمن . لكن ضميري سينوء بذنوب خطيرة ازاء روح الوعي المقدسة ، لو اكتفيت بالتعبير عن أهداف الميكانيك بهذه الكلمات ، دون تمحيص ودون تفسير مفصل . دعونا اذن نبسط هذه الذنوب .

ان مانعنيه هنا بكلمتي « وضع » و « مكان » ليس واضحا . لنتصور انني واقف عند نافذة عربة قطار يمضي بسرعة منتظمة ، وانني ادع حجرا يسقط دون قذف من النافذة نحو زيق السكة . سأرى عندئذ ، باهمال تأثير مقاومة الهواء ، ان الحجر يسقط في خط مستقيم . لكن الرجل الذي يراقب حركة السقوط من خارج القطار يلاحظ ان الحجر يسقط نحو الارض في خط منحن شكله قطع مكافيء . وهنا يمكن ان أتساءل : هل « المواضع » التي يمر بها الحجر تقع « في الواقع » على خط مستقيم ام على قطع مكافيء ؟ وفوق ذلك ، ماهو هنا معنى الحركة « في المكان » ؟ ان الجواب يتضح تلقائيا من الاعتبارات الواردة في الفصل السابق . فقبل كل شيء نتحاشى الكلمة الغامضة « مكان » ، التي يجب ان نعترف بأمانة اننا لانستطيع ان نشكل لها هنا أي معنى مفهوم ، ونستبدل بها عبارة « الحركة المنسوبة عمليا الى جسم مقارنة صلب » . ان الاوضاع المنسوبة الى جسم المقارنة (عربة القطار أو زيق السكة) قد تعرفت منذ قليل وفي الفصل السابق بالتفصيل . فاذا ادخلنا عبارة « جملة الاحداثيات » ، التي هي فكرة مفيدة في التوصيف الرياضي ، بدلا من « جسم المقارنة » ، نكون قد أصبحنا في وضع يتيح لنا ان نقول : ان الحجر يسير في خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات مربوطة ربطا صلبا بالعربة ، اما بالنسبة لجملة احداثيات مربوطة ربطا صلبا بالارض

(بالزيق) فانه يرسم قطعا مكافئا . وبفضل هذا المثال يتضح انه لايوجد شيء اسمه مسار (يقال : المنحني ـ المحرك (١)) مستقل بوجوده ، بل يوجد حصرا مسار منسوب الى جسم مقارنة خاص .

ولكي نحصل على توصيف تام للحركة ، يجب ان ندقق في الكيفية التي يغير بموجبها الجسم موضعه **بمرور الزمن ،** أي اننا ، من اجل كل نقطة من المسار ، يجب ان نذكر في أي زمن كان الجسم موجودا فيها . ان هذه المعطيات يجب ان يضاف اليها تعريف للزمن من شأنه ان يبرز هذه القيم الزمنية اساسيا على شكل مقادير (نواتج اجراءات قياس) قابلة للرصد . فاذا استندنا على اساس من الميكانيك التقليدي امكننا ان نستجيب لهذه الضرورة في مثالنا الملموس بالطريقة التالية : نتصور ميقاتيتين متماثلتين تماما في كل شيء ، يمسك باحداهما الرجل الواقف عند نافذة عربة القطار ويمسك بالاخرى الرجل الواقف ساكنا قرب السكة . وعلى كل من الراصدين ان يحدد على جسم المقارنة الخاص به ، الموضع الذي يحتله الحجر لدى كل دقة من دقات الميقاتية التي يمسكها بيده . ونحن ، في هذا الامر ، لم نأخذ بعين الاعتبار الفروق الزمنية الناجمة عن محدودية سرعة انتشار الضوء . وسنعود لمعالجة هذه الصعوبة ، وصعوبة ثانية ترد هنا ، فيما بعد .



(١) ـ هو المنحني الذي يرسمه الجسم اثناء الحركة .

٤ ـ جملة الإحداثيات الغاليلية

معلوم ان قانون غاليله ــ نيوتن « Galilei - Newton » ، الاساسي في الميكانيك والمعروف باسم **قانون العطالة** ، يمكن ان ينص عليه بما يلي :

« ان الجسم البعيد بعدا كافيا عن اي جسم آخر يستمر في حالة سكون أو في حركة منتظمة في خط مستقيم . ان هذا القانون لايعبر فقط عن شيء ما بخصوص حركة الاجسام بل يشير ايضا الى اجسام مقارنة او جمل احداثيات ، مقبولة في الميكانيك ، يمكن استخدامها في التوصيف الميكانيكي . فالنجوم المرئية الثابتة هي اجسام يصح حتما من أجلها قانون العطالة بدرجة عالية من الدقة . فاذا استخدمنا جملة احداثيات وثيقة الارتباط بالارض ، فان كل نجم ثابت يرسم ، بالنسبة لهذه الجملة وفي حركته الفلكية اليومية ، دائرة ذات نصف قطر عظيم ، وهذه الظاهرة تتعارض مع قانون العطالة لدرجة أننا اذا التزمنا بهذا القانون وجب علينا ان ننسب هذه الحركات الى جمل احداثيات لاتتحرك بالنسبة لها النجوم الثابتة حركة دائرية . فجملة الاحداثيات التي تنسجم ، بالنسبة لها ، هذه الحركات مع قانون العطالة تسمى « جملة احداثيات غاليليه » . فقوانين غاليله ــ نيوتن في الميكانيك يمكن ان تكون صحيحة من أجل جملة احداثيات غاليلية فقط .



٥ ـ مبدأ النسبية (بالمعنى المقصور)

دعونا ، في سبيل ان نبلغ أعظم وضوح ممكن ، نعد الى مثالنا في عربة القطار المفروض أنه يتحرك بانتظام . نسمي حركته انسحابا منتظما (« انسحاب » لان العربة ، بالرغم من تغير موضعها بالنسبة لزيق السكة ، لاتقوم بأي دوران ، و « منتظمة » لان سرعة العربة ومنحاها ثابتان) . ولنتصور أن غرابا يطير في الهواء بحيث تبدو من الزيق حركته منتظمة وفي خط مستقيم . فاذا كنا نرصد طيران الغراب من العربة المتحركة فسنجد حتما ان حركته ذات سرعة ومنحى مختلفين عما سبق ولكنها ماتزال منتظمة وفي خط مستقيم . نعبر عن هذه الظاهرة بالاسلوب التجريدي التالي . اذا كانت الكتلة m متحركة بانتظام وفي خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات K ، فانها ستكون أيضا متحركة بانتظام وفي خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات ثانية K' شريطة ان تكون الجملة الثانية ذات حركة انسحابية منتظمة بالنسبة لـ K . وبموجب المناقشة التي مرت في الفصل السابق ينتج مايلي :

اذا كانت K جملة احداثيات غاليلية فان كل جملة احداثيات اخرى K' تكون غاليلية أيضا عندما تكون حركتها بالنسبة لـ K انسحابية منتظمة. وبذا تكون قوانين غاليله ـ نيوتن صحيحة بالنسبة لـ K' تماما كما هي بالنسبة لـ K .

ونتقدم خطوة أخرى في تعميمنا هذا عندما نصوغ هذا المبدأ هكذا :

اذا كانت K' جملة احداثيات متحركة ، بالنسبة لـ K ، حركة منتظمة خالية من الدوران ، فان الظواهر الطبيعية تستمر في جريانها بالنسبة لـ K'

خاضعة تماما لنفس القوانين التي تخضع لها بالنسبة لـ K . ان هذا النص يدعى **مبدأ النسبية** (بالمعنى المقصور (١)) .

طالما بقي المرء مقتنعا بأن كل الظواهر الطبيعية قابلة للادراك بالاستعانة بقوانين الميكانيك التقليدي ، فلا حاجة به للارتياب في صحة مبدأ النسبية هذا .

بيد انه لدى النظر في التقدم الحديث لعلمي التحريك الكهربائي والضوء، برز بشكل أكثر فاكثر وضوحا ان الميكانيك التقليدي لايقدم اساسا كافياً للتفسير الفيزيائي لكل الظواهر الطبيعية . وببلوغ هذه النقطة اصبح السؤال عن صحة مبدأ النسبية ناضجا للمناقشة ، ولم يبد مستحيلا ان جواب هذا السؤال يمكن ان يكون سلبيا .

على ان هناك امرين عامين كانا منذ البدء في صالح صحة مبدأ النسبية. فبالرغم من ان الميكانيك التقليدي لايزودنا بأساس واسع يكفي للتفسير النظري لكل الظواهر الفيزيائية ، الا انه يجب علينا ان نوليه قسطا كبيرا من « الحقيقة » طالما هو يزودنا ، بخصوص حركة الاجرام السماوية الفعلية ، بدقائق التفاصيل التي تثير الاعجاب . فمبدأ النسبية لابد اذن ان ينطبق بدقة عظيمة في مجال **الميكانيك** . لكن وجود مبدأ على هذه الدرجة من العمومية وعلى هذه الدرجة من الدقة في أحد مجالات الظواهر ، ولا يكون مع ذلك صالحا في سواها ، هو أمر ليس ، **لاول وهلة** ، محتملا جدا .

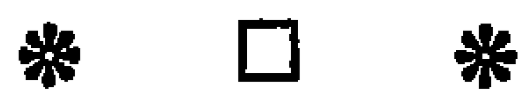
والآن نعالج الدليل الثاني الذي سنعود اليه مرة اخرى فيما بعد . فلو كان مبدأ النسبية (بمعناه المقصور) غير صحيح ، فان جمل الاحداثيات الغاليلية ، K و K′ و K″ و ... ، التي يتحرك كل منها بالنسبة لكل واحد آخر حركة انسحابية منتظمة ، لاتكون عندئذ **متكافئة** من اجل توصيف الظواهر

---

(١) ـ يسمي الفرنسيون هذا النص مبدأ النسبية المقصورة ، اي المقصورة على جمل الاحداثيات الغاليلية ، ويسميه الانكليز والامريكيون مبدأ النسبية الخاصة (بالجمل نفسها) . (المترجم) .

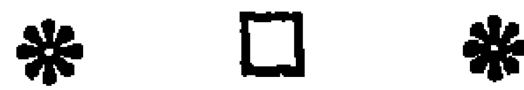
الطبيعية . وفي هذه الحالة سنضطر للاعتقاد بأن قوانين الطبيعة قابلةللصياغة بشكل جد بسيط ، شريطة ان نكون طبعا قد اخترنا ، مـن بين كـل جمل الاحداثيات الغاليلية المكنة ، جملة **واحدة** K_0 ذات حركة خاصة ونتخذها جسم مقارنة ، وهذا مايسوغ لنا عندئذ (بسبب مزايا هذه الجملة في تفسير كل الظواهر الطبيعية) ان نقول عن هذه الجملة انها «في حالة سكون مطلق» . فلو كان زيق السكة ، مثلا ، هو الجملة K_0 ، فان عربة القطار ستكون عندئذ جملة K تصبح قوانين الطبيعة فيها اقل بساطة مما هي عليه في الجملة K_0 . وهذا النقص في البساطة يجب ان يعزى عندئذ الى ان العربة K لابد انتكون في حالة حركة « مطلقة » (اي بالنسبة لـ K_0) . ولا بد ان تؤثر قيمة سرعة العربة وجهتها في شكل قوانين الطبيعة العامة بالنسبة للجملة K . اذ يجب، مثلا ، ان نتوقع ان النغمة الصادرة عن بزمار موضوع في منحى حركةالعربة ستختلف عن النغمة المسموحة عندما يكون المزمار عموديا على منحى الحركة. هذا وان الارض في حركتها جول الشمس تشبه عربة قطار تتحرك بسرعـة قريبة من ٣٠ كيلو مترا في الثانية الواحدة . فاذا كان مبدأ النسبية غـير صحيح فيجب ان نتوقع ان يتدخل منحى حركة الارض باستمرار فيالقوانين العامة للطبيعة ، وان نتوقع ايضا ان يتوقف سلوك الجمل الفيزيائية علـى اتجاهها المكاني بالنسبة للارض .

وبسبب تغير بمنحى سرعة حركة الارض حول الشمس خلال ايامالسنة، فان الارض لايمكن ان تكون بالنسبة للجملة الافتراضية K_0 ، ساكنة طوال ايام السنة بكاملها . لكن اكثر الارصاد دقة لم تكشف قط اية خاصة منحوية للفضاء الفيزيائي الارضي ، اي انها لم تكشف اي خلل فيزيائي ناجم عن تغير منحى الحركة . ان هذا الواقع يشكل دليلا قويا على صحة مبدأ النسبية .



٦ ـ جمع السرعات المستعمل في الميكانيك التقليدي

لفترض ان رفيقتنا القديمة ، عربة القطار ، تسافر على السكة بسرعة ثابتة V (١) ، وان رجلا يعبر العربة على طولها في منحى حركة القطار بالسرعة w (٢) . فبأية سرعة W يتحرك الرجل بالنسبة لزيق السكة اثناء سيره ؟ ان الجواب الوحيد البسيط يبدو ناتجا من الاعتبارات التالية: اذا توقف الرجل عن السير ثانية واحدة فانه سيقطع ، اثناءها وبالنسبة لزيق السكة ، مسافة تساوي عدديا سرعة العربة V . ولكنه اذا كان سائرا اثناء هذه الفترة فسيقطع مسافة اضافية ، بالنسبة للعربة ، تساوي w فهو بالتالي سيقطع بالنسبة لزيق السكة وخلال فترة الثانية الزمنية نفسها واثناء سيره ، المسافة $W = V + w$ وسنرى فيما بعد ان هذه النتيجة، التي تعبر عن نظرية جمع السرعة المستخدمة في الميكانيك التقليدي ، لايمكن الاحتفاظ بها ، أو بتعبير آخر ، ان القانون هذا الذي كتبناه ليس صحيحا في الواقع . لكننا ، مع ذلك ، سنفترض في الوقت الحاضر انه صحيح .



(١) ـ أي أنه يقطع مسافة طولها V خلال ثانية زمنية واحدة . (المترجم) .

(٢) ـ أي أنه يقطع ، بالنسبة للعربة ، مسافة w خلال ثانية واحدة . (المترجم) .

٧ – التعارض الظاهر بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية

ليس من السهل ان نجد في الفيزياء قانونا ابسط من القانون الذي يقول بأن الضوء ينتشر في الفضاء الخالي . وكل تلميذ في المدرسة يعرف، او يعتقد أنه يعرف ، ان هذا الانتشار يحدث في خط مستقيم وبسرعة عظيمة تساوي C = 300,000 كيلو متر/ثانية . وعلى كل حال نحن نعرف بيقين كبير ان هذه السرعة واحدة لكل الالوان بدليل ان كل الالوان الضوئية الآتية الينا من احد النجوم تنحجب كلها دفعة واحدة عندما يحدث لهذا النجم كسوف بنجم مظلم يجاوره . ومن خلال تأملات مماثلة لهذه ، تستند على أرصاد النجوم المضاعفة ، تمكن الفلكي دوسيتر DE SITTER من اثبات ان سرعة انتشار الضوء لايمكن ان تتعلق بسرعة حركة الجسم الذي يصدره. هذا وان افتراض ان سرعة الانتشار هذه تتعلق بمنحى الانتشار « في المكان » هو أمر غير محتمل بحد ذاته .

وبمختصر القول ، دعونا نفترض ان القانون الذي ينص على ثبات سرعة الضوء C (في الخلاء) يسوغه اعتقاد تلميذ المدرسة به . فمن ذا الذي كان يتصور ان هذا القانون البسيط يمكن ان يغرق الفيزيائيين في خضم من المصاعب الفكرية ؟ لنفحص اذن كيف نشأت هذه المصاعب .

علينا بالطبع ان ننسب عملية انتشار الضوء (وكل عملية أخرى في الواقع) الى جسم مقارنة صلب (جملة احداثيات) . وبمثابة جملة كهذه نتخذ زيق سكتنا السابق . ونتخيل ان الهواء المحيط بها قد أزيل . فاذا أرسل شعاع على طول السكة ، نستنتج مما سبق ان مقدمة الشعاع ستنتقل

بالسرعة C بالنسبة للسكة . لنفترض من الآن ان عربة القطار تسير على السكة بالسرعة V وبنفس اتجاه انتشار الشعاع الضوئي ، ولكن بسرعة اقل بكثير من C طبعا . فمن الواضح أننا نستطيع ان نكرر هنا المحاكمةالسابقة لان مقدمة الشعاع الضوئي تلعب دور الرجل الماشي في العربة . فسرعة الرجل ، W بالنسبة للزيق هناك تقابلها سرعة الضوء بالنسبة للزيق هنا . فاذا رمزنا بـ W لسرعة الضوء بالنسبة للعربة نجد :

$$w = c - v$$

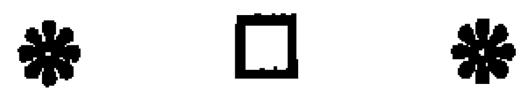
أي ان سرعة الشعاع الضوئي بالنسبة للعربة تغدو اصغر من C .

لكن هذه النتيجة تناقض مبدأ النسبية الوارد في الفصل الخامس . ذلك لان قانون انتشار الضوء ، ككل قوانين الطبيعة الاخرى وبموجبمبدأ النسبية ، يجب ان يظل كما هو سواء بالنسبة للعربة كجسم مقارنة او بالنسبة للسكة كجملة مقارنة أخرى . لكن المحاكمة الواردة هنا تشير الى استحالة تحقق ذلك . لانه اذا كان الشعاع ينتشر بالنسبة للزيق بالسرعة C فان تلك المحاكمة تدل بالضرورة على وجوب وجود قانون انتشار آخر للضوء بالنسبة للعربة ــ وهذا ما يتعارض مع مبدأ النسبية .

وازاء هذا المأزق يبدو ان لاخيار لنا للخروج الا عن احد طريقين : فأما ان ننبذ مبدأ النسبية او ان ننبذ القانون البسيط لانتشار الضوء **في الخلاء** . ان الذين تتبعوا منكم المناقشة السابقة بانتباه يتوقعون بما يشبه اليقين أننا لابد ان نحتفظ بمبدأ النسبية لانه يشد اهتمام الذهن المفكر ببساطته وعفويته . وعندئذ لابد من ان نبدل قانون انتشار الضوء **في الخلاء** بقانون أقل بساطة منسجم مع مبدأ النسبية . هذا ويدل تقدم الفيزياء النظرية أننا لانستطيع ، على كل حال ، الاستمرار في هذا الطريق . فقد أثبتت التحريات النظرية المعاصرة التي قام بها هـ .أ. لورنتس **H.A.LORENTZ** على الظواهر الكهروحركية والضوئية الناجمة عن الاجسام المتحركة ان التجربة في هذا المجال تقود حصرا الى نظرية في الظواهر الكهرطيسية يبرز منها قانون

ثبات سرعة الضوء **في الخلاء** كنتيجة محتومة . وقد كان هناك فيزيائيون نظريون كبار ينزعون الى نبذ مبدأ النسبية بالرغم من واقع انه لايوجد اية معطيات تجريبية تناقضه .

ووصولا الى هذه الحال دخلت نظرية النسبية الى مسرح الفيزياء . وبنتيجة تحليل مفهومي الزمان والمكان الفيزيائيين اتضح **في الواقع انه لايوجد اي تعارض بين مبدأ النسبية وقانون انتشار الضوء** ، كما اتضح من وضع هذين القانونين على المحك بأسلوب منهجي امكانية التوصل الى نظرية متينة. وقد أطلق على هذه النظرية اسم **نظرية النسبية الخاصة** لتمييزها عن النظرية العامة التي سنعالجها فيما بعد . أما في الصفحات التالية فسنعرض الافكار الاساسية لنظرية النسبية الخاصة .



٨ ـ حول فكرة الزمن في الفيزياء

تصوروا ان نورين ينبثقان على السكة من مكانين B , A متباعدين. افترض بالاضافة لذلك ان هاتين الاشارتين الضوئيتين تحدثان متزامنتين(١). فلو سألتكم اذا كان يوجد لهذا الافتراض معنى ، ستجيبون عن هذا السؤال ب « نعم » مؤكدة . لكنني لو رجوتكم الآن ان تشرحوا لي معنى هذا الافتراض بتدقيق أكبر فستجدون بعد فترة من التفكير ان الجواب عن هذا السؤال ليس من السهولة بما يبدو لاول وهلة .

وبعد فترة من التفكير ربما يخطر لكم الجواب التالي : « ان مدلول هذا الافتراض واضح من تلقاء ذاته ولا يحتاج الى أي شرح اضافي ، وقد يلزمني بالطبع قسط من انعام النظر اذا طلب الي ان أعين بالرصد ، وفي الحالة الراهنة ، فيما اذا كان الحادثان يقعان متزامنين أم لا . » لكنني لن أرضى بهذا الجواب للسبب التالي . لنفترض ان انسانا خبيرا بعلم القياس تمكن، بنتيجة تأملات عبقرية ، أن يستنبط ان الاشارتين الضوئيتين تقعان دوما في لحظة واحدة ، لابد له عندئذ من ان يقوم بالتجربة كي يعلم فيما اذا كان استنتاجه النظري يتفق مع الواقع أم لا . ونحن نصادف هذه الصعوبة لدى كل افتراض فيزيائي يتدخل فيه مفهوم « التزامن » ذلك لانه لاوجود عند الفيزيائي لاي مفهوم مالم يتمكن ، عمليات وفي كل حالة ، من اكتشاف واقعيته او عدمها . وهكذا نحتاج الى تعريف للتزامن يزودنا بطريقة نستطيع بواسطتها في مثالنا الراهن ، ان نقرر بالتجربة فيما اذا كانت الاشارتان الضوئيتان تقعان متزامنتين ام لا . وطالما بقيت الحاجة الى هذا التعريف غير مقضية ، يحق

---

(١) أي في زمن واحد ، وقد نقول في لحظة واحدة . (المترجم) .

لي ان اتذمر كفيزيائي (وهذا القول يصح بالطبع ولو لم أكن فيزيائيا) عندما أتصور أنني قادر على ايجاد مدلول لفرضية التزامن . (أود ان أوصي القارىء ان لايستمر في القراءة قبل ان يقتنع بهذا الامر) .

وبعد التفكير في هذا الموضوع مليا قد تعرضون الاقتراح التالي للتحقق من التزامن : نقيس المسافة A B على السكة ونضع راصدا في منتصفها M . ونزود هذا الراصد بجهاز (بمرآتين تصنعان بينهما زاوية قائمة ، مثلا(١)) يتيح له ان يرى المكانين A , B دفعة واحدة . فاذا رأى الراصد الاشارتين الضوئيتين في لحظة واحدة ، نقول انهما متزامنتان .

انني مسرور جدا من هذا الاقتراح ، ولكنني لايمكن ان اعتبر أنه قد حل المشكلة نهائيا ، فانا اشعر انني مضطر لان أثير الإعتراض التالي : « أن هذا التعريف للتزامن لن يكون بالتأكيد صحيحا الا اذا أيقنت أن الضوء ، الذي يرى الراصد M بفضله الاشارتين الضوئيتين ، يقطع المسافة A ⟵ M بالسرعة التي يقطع بها المسافة B ⟵ M . لكن فحص هذا الافتراض لايمكن ان يتم الا اذا كنا مزودين سلفا بما يتيح لنا قياس الزمن . ومن هذه المناقشة يظهر لنا أننا ندور هنا في حلقة مفرغة .

وبعد تفكير ملي ترمقونني بنظرة فيها شيء من عدم الاكتراث — ولكم الحق — ثم تقولون : « نحن متمسكون مع ذلك بتعريفنا السابق ، لانه لايفترض مطلقا أي شيء بخصوص الضوء . والشيء **الوحيد** الذي يتطلبه تعريف التزامن هذا هو وجوب ان يمكننا من اتخاذ قرار عملي حول ما اذا كان المفهوم الذي نستهدف تعريفه قد حصل أم لا . وهذا الشرط محقق بلا ريب في التعريف الذي افترضاه . اما شرط ان يكون الضوء قد استغرق فترة واحدة على الطريق A ⟵ M وعلى الطريق B ⟵ M فليس هو **افتراضا ولا فرضية** بخصوص الطبيعة الفيزيائية للضوء ، انما هو **مصطلح** يمكن ان أعتمده بملء حريتي كي أتوصل الى تعريف للتزامن » .

(١) — يضع الراصد هذا الجهاز أمام عينيه بحيث يكون الحرف المشترك للمرآتين شاقوليا وبحيث تكونان متساويتي الميل على المستقيم AB ، فيرى عندئذ فيهما خيالي النقطتين A , B في منحى واحد عمودي على المستقيم AB « المترجم » .

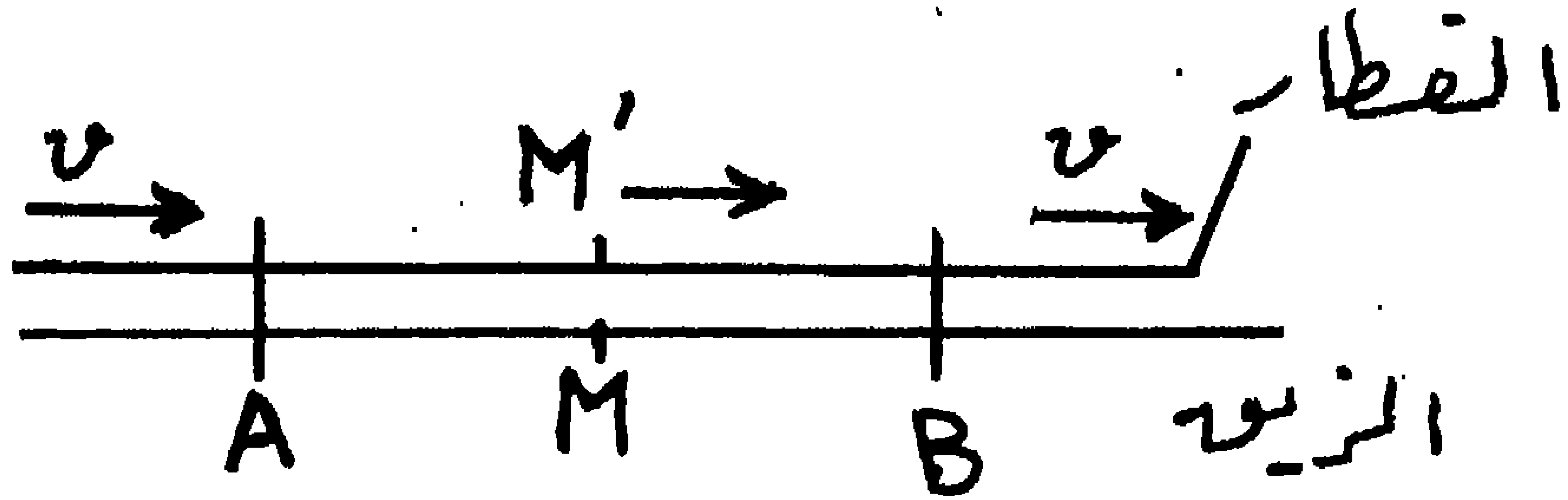
من الواضح ان هذا التعريف يمكن ان يستخدم لاعطاء معنى سـديد لا لتزامن الحادثين الاثنين فحسب بل لتزامن أي عدد من الحـوادث أهتم باختيارها ، وبصورة مستقلة عن المواضع التي تقع فيها هذه الحوادث بالنسبة لجسم المقارنة (١) (زيق السكة هنا) . وبذلك نجد انفسنا مسوقين الـى تعريف « الزمن » في الفيزياء . ولاجل ذلك نفترض ميقاتيات متماثلة التركيب موضوعة في النقاط A و B و C من خط السكة (جملة الاحداثيات) وأنها منظمة بحيث تكون أوضاع عقاربها متطابقة بالتزامن (بالمعنى المفهوم أعلاه) . ضمن هذه الشروط نفهم « زمن » الحادث بمعنى أنه الوضع (وضع العقربين) الذي نقرأه على الميقاتية الواقعة في الجوار (في المكان) القريب جدا من الحادث. وبهذه الطريقة نقرن « قيمة الزمن » بكل حادث يتصف اساسيا بامكانيـة رصـده .

ان هذا الاصطلاح ينطوي على فرضية فيزيائية اضافية مـن الصعب ان ترتاب في صحتها دون اثبات عملي للفرضية المضادة لها . فقد قبلنا ان جميع هذه الميقاتيات تعمل **بايقاع واحد** اذا كانت متطابقة التركيب . وبتعبير أدق نقول : اذا كانت الميقاتيتان الساكنتان في مكانين مختلفين من جسم مقارنة منظمتين بحيث يتزامن (بالمعنى المعتمد اعلاه) **أحد** أوضاع عقارب احداهما مع وضع **مماثل** لعقارب الاخرى ، فان هذا « التزامل » بين نظامي سـير الميقاتيتين يبقى متزامنا (بالمعنى المعتمد تعريفه أعلاه) دوما .

(١) ــ نفترض أيضا انه : عندما تقع ثلاثة حوادث A و B و C في ثلاثة امكنة مختلفة وبحيث يكون A , B متزامنين وكذلك C,B متزامنين (بالمعنى المعتمد اعلاه) فان معيار التزامن يتحقق عندئذ أيضا بين C,A . ان قبول هذه النتيجة يتضمن فرضية بخصوص قانـون انتشار الضوء . وهي بالتأكيـد محققـة عندما نتمسك بقانون ثبات سرعة الضـوء في الخـــلاء .

٩ - نسبية التزامن

لقد استفدنا في محاكماتنا حتى الآن على وجود جسم مقارنة جسدناه بـ « زيق السكة » . نتصور الآن قطارا طويلا جدا يسير على السكة بسرعة V ثابتة وبالاتجاه المرسوم على الشكل (١) . فمن الملائم للمسافرين ان



الشكل رقم ـ ١ ـ

يتخذوا القطار نفسه جسم مقارنة صلب (جملة احداثيات) ، فهم يرون كل الحوادث كما تبدو من القطار . فكل حادث يقع في موضع من السكة يقع أيضا في نقطة معينة من القطار . وهنا أيضا يمكن اعطاء التزامن بالنسبة للقطار تعريفا يماثل تماما تعريف التزامن بالنسبة للزيق . وكنتيجة طبيعية لذلك يبرز السؤال التالي :

هل الحادثان (الاشارتان الضوئيتان في B , A) المتزامنان **بالنسبة لزيق السكة** يكونان متزامنين ايضا بالنسبة للقطار ؟ سنبرهن فورا ان الجواب عن هذا السؤال هو النفي .

فعندما نقول ان الاشارتين النابعتين من B , A متزامنتان بالنسبة

للزيق فاننا نعني ان الشعاعين الصادرين عن المكانين B , A ، حيث حدثت الاشارتان ، يلتقيان في نقطة المنتصف من المسافة AB على الزيق .

لكن الحادثين B , A يقابلان أيضا موضعين B ,A على القطار. لتكن M' نقطة منتصف المسافة AB على القطار المسافر . ففي لحظة حدوث الاشارتين بالضبط(١) ، تكون هذه النقطة M' منطبقة طبعا على النقطة M ، ولكنها متحركة نحو يمين المخطط في الشكل (١) بسرعة القطار V . فاذا وجد راصد في الموضع M' من القطار وكان لايتمتع بهذه السرعة فسيبقى دوما في M وسيصل الضوءان الآتيان من B , A اليه متزامنين ، اي انهما سيلتقيان في مكان وجوده بالضبط . ولكنه ، في واقع الامر ، يسرع (بالنسبة لزيق السكة) نحو الشعاع الضوئي الآتي من B ، بينما هو يهرب من الشعاع الضوئي الآتي من A . وبذلك يرى هذا الراصد النور الآتي من B قبل ان يرى النور الآتي من A . فالراصد الذي يتخذ القطار كجملة مقارنة سيجد حتما ان الاشارة الضوئية قد انطلقت من B قبل ان تنطلق الاشارة الضوئية من A . وهكذا نتوصل الى النتيجة الهامة التالية :

ان الحوادث المتزامنة بالنسبة للزيق ليست متزامنة بالنسبة للقطار والعكس بالعكس (نسبية التزامن) . فكل جسم مقارنة (جملة احداثيات) لها زمنها الخاص بها . وما لم نعلم جسم المقارنة الذي ننسب الزمن اليه فليس ثمة معنى لاي قول عن زمن الحادث .

هذا وقبل اكتشاف نظرية النسبية كان يعتقد ضمنا في الفيزياء أن الزمن مفهوم ذو معنى مطلق ، أي انه مستقل عن الحالة الحركية لجسم المقارنة . لكننا رأينا هنا ان هذا الاعتقاد يتناقض مع اكثر تعاريف التزامن عفوية وتلقائية . فاذا تخلينا عن هذا الاعتقاد فسيزول التناقض بين قانون سرعة الضوء في الخلاء وبين مبدأ النسبية (المشروح في الفصل السابع).

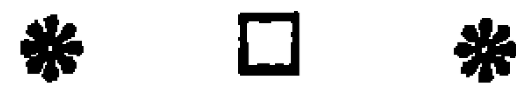
ولقد وقعنا في هذا التناقض نتيجة الاعتبارات التي اوردناها في الفصل

---

(١) ـ كما نحكم على ذلك من زيق السكة .

السادس والتي لم تعد واردة بعد الآن . ففي ذلك الفصل استنتجنا أن الرجل الماشي في العربة والذي يقطع المسافة w **في الثانية الزمنية** بالنسبة للعربة ، يقطع المسافة نفسها ايضا بالنسبة لزيق السكة **في كل ثانية زمنية.** لكننا وبموجب الاعتبارات الواردة هنا، نجد ان المدة التي يستغرقها بالنسبة للعربة حدث معين لايمكن ان تساوي المدة التي يستغرقها الحدث نفسه منظورا اليه من الزيق (كجسم مقارنة) . وبذلك لايمكن ان نستنتج ان الرجل الماشي يقطع بالنسبة لخط السكة المسافة w أثناء مدة تساوي ثانية واحدة من الزمن المقيس من الزيق .

وفوق ذلك ، فان الاعتبارات الواردة في الفصل السادس ماتزال تستند على مصطلح ثان يبدو اعتباطيا في ضوء المحاكمة البحتة ، بالرغم من أنه كان مقبولا بشكل ضمني حتى قبل ادخال نظرية النسبية .



١٠ ــ نسبية مفهوم المسافة

لنعتبر نقطتين معينتين من القطار المسافر بالسرعة V بالنسبة لزيق السكة ، ولنحصر اهتمامنا بالمسافة التي تفصل بينهما . لقد عرفنا منذ قليل ان من الضروري أن نملك جسم مقارنة ننسب اليه المسافة عندما نستهدف اجراء عملية قياس لها . ان أبسط مايمكن ان نفعله بهذا الصدد هو اختيار القطار نفسه كجسم مقارنة (جملة احداثيات) . فالراصد الموجود في القطار يقيس هذه المسافة بواسطة قضيب القياس الذي لديه وبعدد المرات التي تحويها هذه المسافة من طول القضيب بدءا من احد طرفي المسافة حتى طرفها الآخر على خط مستقيم (على طول أرض العربة مثلا) . ان عدد المرات المحصول عليه بهذه الطريقة هو قياس المسافة المطلوبة .

لكن اجراء قياس هذه المسافة نفسها ونحن على زيق السكة امر مختلف تماما . فهنا تنطرح من تلقاء ذاتها الطريقة التالية : اذا رمزنا بـ A´ و B´ للنقطتين على القطار المسافر واللتين نستهدف قياس المسافة بينهما ، فان هاتين النقطتين متحركتان بسرعة واحدة V على طول الزيق . فقبل كل شيء يلزمنا ان نعين على الزيق النقطتين A , B اللتين تقابلان ، تماما ومواجهة ، النقطتين A´ و B´ في لحظة الزمن الخاصة t ــ كما نعينهما من الزيق . ان هاتين النقطتين A , B على الزيق يمكن ان تتعينا بتطبيق تعريف الزمن الوارد في الفصل الثامن . اما المسافة بين هاتين النقطتين A و B فتقاس بطريقة التطبيق المتكرر لقضيب القياس على طول الزيق .

ليس من المؤكد سلفا ان هذا القياس الثاني سيعطي نتيجة مطابقة لما يعطيه القياس الاول . وعندئذ يكون طول القطار كما يقاس من زيق السكة مختلفا عن الطول المحصول عليه كما يقاس في القطار نفسه . وهذه الحال تقودنا الى اعتراض ثان تجب اثارته ضد المحاكمة الواضحة ظاهريا ، التي وردت في الفصل السادس . أي : اذا كان الرجل في العربة يقطع المسافة w في واحدة الزمن ـ **كما يقاس من القطار** ـ فان هذه المسافة ـ **كما تقاس من الزيق** ـ لن تكون اذن بالضرورة مساوية w .

* ☐ *

١١ ـ تحويل لورنتس

ان نتائج الفصول الثلاثة السابقة ترينا ان التناقض الظاهري بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية (الفصل السابع) قد برز من خلال محاكمة مستمدة من فرضيتين غير مسوغتين مأخوذتين من الميكانيك التقليدي ، وهما:

١ ـ ان الفاصل الزمني (الزمن) بين حادثين مستقل عن ظروف حركة جسم المقارنة .

٢ ـ ان الفاصل المكاني (المسافة) بين نقطتين على جسم صلب مستقل عن ظروف حركة جسم المقارنة .

فاذا نبذنا هاتين الفرضيتين ، فان التناقض الوارد في الفصل السابع يزول ، لان نظرية جمع السرع التي استخرجناها في الفصل السادس تفقد صحتها . وعندئذ تتاح من تلقاء نفسها امكانية ان ينسجم قانون انتشار الضوء في الخلاء مع مبدأ النسبية ، كما ينطرح السؤال التالي : كيف يجب ان نعدل محاكمات الفصل السادس كي نزيل الاختلاف بين النتيجتين الاساسيتين للخبرة التجريبية ؟ ان هذا السؤال يقود الى سؤال عام . ففي المناقشة الواردة في الفصل السادس كنا نتعامل مع أمكنة وازمنة منسوبة كلها الى القطار تارة والى الزيق تارة اخرى . فكيف نستطيع ان نجد مكان وزمان حادث كما يبدوان من القطار عندما نعرف مكان وزمان الحادث نفسه كما يبدوان من زيق السكة ؟ هل يوجد لسؤال من هذا القبيل جواب تفكيري يزيل التناقض بين قانون انتشار الضوء في الخلاء ومبدأ النسبية ؟ وبتعبير آخر : هل يمكن ان نتصور علاقة بين مكان الحادث الواحد وزمانه منسوبين الى كلا جسمي المقارنة بحيث يكون لكل شعاع ضوئي سرعة انتقال واحدة C

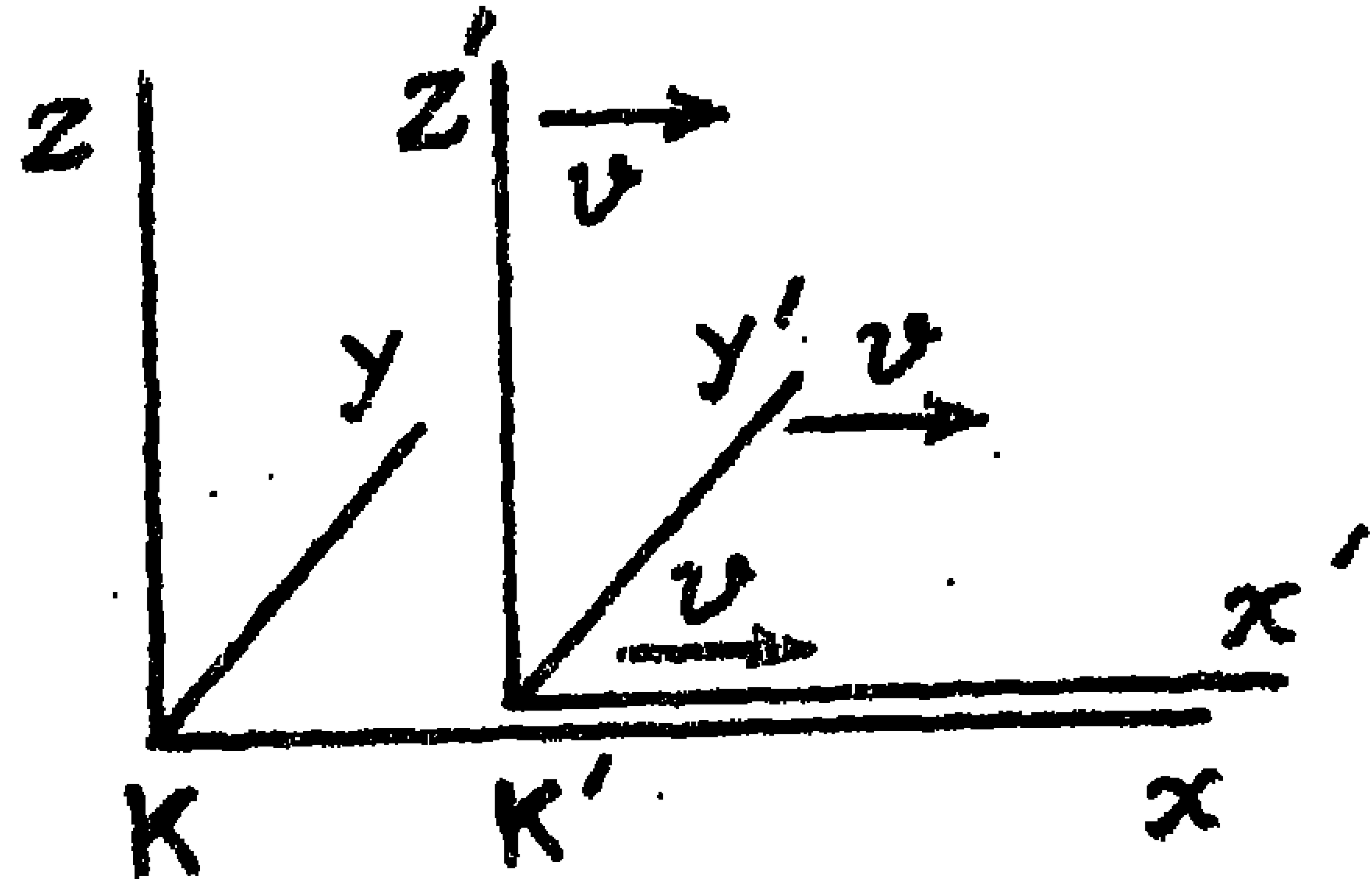
سواء بالنسبة لزيق السكة او بالنسبة للقطار ؟ ان هذا السؤال يقود الى جواب أيجابي محدد تماما ، والى قانون تحويل محدد تماما يتناول قيم المكان ــ الزمان للحادث وينقلنا من جسم مقارنة الى جسم مقارنة آخر .

قبل ان نعالج هذا الموضوع نسوق الامور العابرة التالية . لقد تناولنا حتى الآن حوادث تقع على طول الزيق ، مما يجعلنا ندخل تابعا رياضيا لنقطة موجودة على خط مستقيم . ففي الاسلوب المشار اليه في الفصل الثاني يمكن ان نتخيل جسم المقارنة هذا مكتملا جانبيا وفي مناح متعامدة بواسطة شبكة من القضبان ، بحيث نستطيع ان نحدد مكان أي حادث بالنسبة لشبكة القضبان هذه . كما يمكن ان نتخيل القطار المسافر بالسرعة V ممتدا عبر الفضاء كله ، بحيث ان كل حادث ، مهما كان بعيدا ، يمكن أيضا ان نحدد مكانه بالنسبة لشبكة القضبان الثانية (١) ودون ان نرتكب اي خطأ جوهري يمكن ان نضرب صفحا عن واقع ان هاتين الشبكتين ستتصادمان معا باستمرار بسبب عدم امكانية تداخل الاجسام الصلبة . وسنتخيل في كل شبكة من هذا النوع ثلاثة سطوح متعامدة نتخذها « مستويات احداثيات » (« جملة احداثيات ») . سنرمز عندئذ ب K لجملة الاحداثيات المربوطة بزيق السكة و بـ K' لجملة الاحداثيات المربوطة بالقطار . فأي حادث ، حيثما وقع ، سيتعين في الفضاء وبالنسبة لـ K بواسطة أطوال الاعمدة الثلاثة z, y, x على مستويات الاحداثيات ، وبالنسبة للزمن بالقيمة الزمنية t . أما بالنسبة لـ K' فيتعين الحادث نفسه مكانيا وزمانيا بالقيم المقابلة t', z', y', x' التي تختلف طبعا عن t, z, y, x . وقد شرحنا من قبل وبالتفصيل كيف يمكن لهذه القيم ان تعتبر نتائج لعمليات قياس فيزيائي .

من الواضح الآن ان مسألتنا يمكن تماما ان تصاغ على النحو التالي .

---

(١) ــ الموجودة في هذا القطار الهائل الحجم (المترجم) .



الشكل رقم ـ ٢ ـ

كيف يمكن ان نحسب القيم t', z', y', x' للحادث منسوبا الى K' عندما نعطي القيم $t, z, y, x,$ للحادث نفسه منسوبا الى K ؟

ان العلاقات المطلوبة يجب ان تختار بحيث تستجيب لقانون انتقال الضوء في الخلاء ، من اجل الشعاع الضوئي الواحد نفسه (وبالطبع من أجل أي شعاع آخر) ، سواءا النسبة لـ K او لـ K' . ان العلاقات التالية ، من اجل التوجيه النسبي لجملتي الاحداثيات المرسومتين في الشكل (٢) ، تستجيب لهذا الشرط :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} . x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ان مجموعة المعادلات هذه معروفة باسم « تحويل لورنتس LORENTZ » (١) .

هذا ولو كنا اتخذنا ، بدلا من قانون انتقال الضوء ، الافتراضات التي ينطوي عليها الميكانيك التقليدي حيث المسافة والزمن مقداران مطلقان(٢) ،

(١) ـ نشرح في الملحق ٢ طريقة بسيطة لايجاد تحويل لورنتس .

(٢) ـ اي لاتتوقف قيمتاهما على الحالة الحركية للراصد الذي يقيسهما . (المترجم) .

مستندا لايجاد تحويل يستجيب لهذه الافتراضات لوجدنا ، بدلا من التحويل السابق ، المعادلات التالية :

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = t$$

وتسمى مجموعة المعادلات هذه « تحويل غاليله » . ويمكن الحصول عليها من تحويل لورنتس باعطاء سرعة الضوء C فيه قيمة لامتناهية في الكبر .

يمكن ان نبرهن فورا ، بالاستناد الى تحويل لورنتس ، على ان قانون انتقال الضوء في الخلاء محقق في كلا جملتي المقارنة و K' . فالاشارة الضوئية المرسلة على طول محور الفواصل X وبالاتجاه الموجب تتقدم عليه وفق المعادلة (١) :

$$x = ct$$

اي بالسرعة C . وبموجب معادلات تحويل لورنتس تقود هذه العلاقة البسيطة بين t , x الى علاقة بين x' و . فاذا بدلنا X بالقيمة ct في المعادلتين ، الاولى والرابعة من تحويل لورنتس ، نحصل على :

$$x' = \frac{(c - v)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

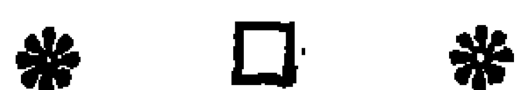
$$t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

وبتقسيم هاتين المساواتين طرفا على طرف نجد فورا : $x' = ct'$

---

(١) — التي هي قانون انتقال الضوء على محور الفواصل X (اي بالنسبة لـ K (المترجم) .

مما يدل على ان الضوء ينتشر بالنسبة لـ K' طبقا لهذه المعادلة . وفيها نرى ان سرعة انتقال الضوء ، كما تقاس من جملة المقارنة K' تساوي C أيضا . ونحصل على النتيجة نفسها لو اعتبرنا شعاعا ضوئيا ينتشر على أي منحى آخر . وليس هذا بالطبع امرا مستغربا لان معادلات تحويل لورنتس قد أوجدت لتستجيب له .



١٢ ـ سلوك قضبان القياس والميقاتيات المتحركة

اضع قضيبا ــ مترا على محور x' من K' بحيث ينطبق احد طرفيه (مبدؤه) على النقطة $x'=0$ بينما ينطبق طرفه الآخر (نهايته) على النقطة $x'=1$. فما هو طول القضيب ـ المتر بالنسبة للجملة K ؟ لكي نعلم ذلك نحتاج فقط لمعرفة أين يقع مبدؤه ونهايته بالنسبة لـ K في لحظة معينة في الجملة K . فمن المعادلة الاولى في تحويل لورنتس نجد احداثيي هاتين النقطتين في اللحظة $t=0$:

$$x = 0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad \text{(مبدأ القضيب)}$$

$$x = 1.\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \quad \text{(نهاية القضيب)}$$

أما المسافة بين النقطتين فهي اذن $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. لكن القضيب ـ المتر متحرك بالسرعة v بالنسبة لـ K . فينتج من ذلك ان طول القضيب ـ المتر الصلب المتحرك في منحى طوله بالسرعة v يساوي $\sqrt{1-v^2/c^2}$ من المتر. فالقضيب الصلب هو ، في حالة الحركة ، أقصر منه وهو في حالة السكون ، وكلما ازدادت سرعته يتقاصر اكثر فأكثر . وعندما يبلغ سرعة الضوء (أي $v = c$) نجد $\sqrt{1-v^2/c^2}=0$ ، وعندما تصبح سرعته أعظم من سرعة الضوء في الخلاء فان الجذر التربيعي يصبح تخيليا . ومن هذا نستنتج

ان سرعة الضوء تلعب في نظرية النسبية دور سرعة حدّية لايمكن لاي جسم حقيقي ان يبلغها ولا ان يتجاوزها .

وهذه الصفة التي تتسم بها سرعة الضوءC ، كسرعة حدّية ، تبرز طبعا وبوضوح من معادلات تحويل لورنتس ، لان هذه المعادلات تصبح عديمة المعنى اذا أعطينا V قيمة أعظم من C

واذا اعتبرنا ، على العكس من ذلك ، قضيبيا — مترا في سكون بالنسبة لـ K على طول المحور x ، فسنجد عندئذ ان طول القضيب ، كما يبدو من الجملة K' يساوي $\sqrt{1-v^2/c^2}$ وهذا يتفق تماما مع مبدأ النسبية الذي يشكل أساس محاكماتنا .

كما أنه من الواضح سلفا اننا لابد قادرون على ان نعلم شيئا بخصوص سلوك قضبان القياس والميقاتيات ، وذلك من معادلات التحويل ، لان قيم t, z, y, x ليست أقل ولا اكثر من نتائج قياس يمكن الحصول عليها بواسطة قضبان قياس وميقاتيات . فلو كنا استندنا في محاكماتنا على تحويل غاليله لما كنا حصلنا على تقلص القضيب أثناء الحركة .

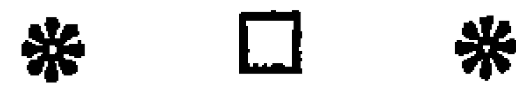
لنعتبر الآن ميقاتية تدق الثانية موضوعة بسكون بالنسبة لـ K' فينقطة المبدأ $(x'=0)$. ليكن $t'=0$ و $t'=1$ دقتين متواليتين من هذه الميقاتية .

نجد عندئذ من المعادلتين ، الاولى والاخيرة من تحويل لورنتس ان زمني هاتين الدقتين كما يبدوان من K هما :

$$t=0 \quad \text{(للدقة الاولى)}$$

$$t=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{(للدقة الثانية)}$$

ان الميقاتية ترى من الجملة K متحركة بالسرعة v ، والمدة الزمنية التي تنقضي بين دقتين متواليتين هي ، كما تبدو من الجملة K ، لاتساوي ثانية واحدة بل تساوي $\sqrt{1-v^2/c^2}$ من الثانية . أي مدة أطول بقليل. وهكذا يبدو عقرب الميقاتيات المتحركة أبطأ في حركته مما يكون في حالة السكون (١) . فهنا أيضا تلعب السرعة C دور سرعة حدية لايمكن تجاوزها.



(١) ـ أي أن الراصد الذي يقارن ميقاتيته بميقاتية رجل آخر متحرك بالنسبة له يرى ان ميقاتية الرجل الآخر تقصر عن ميقاتيته الخاصة . كما ان هذا الرجل الآخر يرى ، هو أيضا ، ميقاتية الراصد تقصر عن ميقاتيته الخاصة . فليس ثمة فرق أساسي بين الراصد والرجل الآخر . وهذا القول ينسحب أيضا على ظاهرة تقاصر القضبان أثناء الحركة . وهذه سمة منطقية من سمات نظرية النسبية لان المهم فيها هو الحركة النسبية لاحد الراصدين (بالنسبة للآخر) . (المترجم) .

١٣ - جمع السرعات النسبوي (تجربة فيزو)

يمكننا عمليا الآن ان نحرك الميقاتيات وقضبان القياس بسرعات صغيرة بالنسبة لسرعة الضوء ، وعلى هذا ، لن نتمكن الا بصعوبة من مقارنة نتائج الفصل السابق مباشرة بما يحدث في الواقع . بيد ان هذه النتائج لابد ان تذهلكم بغرابتها الشديدة . ولهذا السبب اعمد الآن الى ايراد نتيجة اخرى يمكن استخلاصها من الاعتبارات السالفة ويمكن ان نضعها بيسر على محك التجربة .

لقد استخرجنا في الفصل السادس نظرية جمع السرع المتفقة في الاتجاه وعلى الشكل الذي تقود إليه فرضيات الميكانيك التقليدي . ان هذه النظرية يمكن أيضا ان تنتج من تحويل غاليله مباشرة (الفصل ١١) . فبدلا من ان ندخل رجلا يمشي داخل العربة ، نعتبر نقطة متحركة بالنسبة لجملة الاحداثيات K' وفقا للمعادلة :

$$x' = wt'$$

فاذا وضعنا فيها صيغتي x' و t' الواردتين في تحويل غاليله بدلالة x و t نجد المعادلة :

$$x = (v + w)t.$$

وهي ليست سوى قانون حركة النقطة المعتبرة بالنسبة للجملة K (حركة الرجل بالنسبة لزيق السكة) . سنرمز لهذه السرعة بالرمز W وعندئذ نكتب ، كما في الفصل (٦) .

$$W = v + w \qquad \text{(ب)}$$

على أننا يمكن تماما ان نطبق هذه المحاكمة بالاستناد الى نظريةالنسبية.
ولاجل ذلك علينا ان نبدل في المعادلة

$$x' = wt'$$

x' و t' بدلالة x و t كما هما في المعادلتين ، الاولى والرابعة من تحويل لورنتس . وعندئذ وبدلا من المعادلة (ب) نحصل على المعادلة :

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}} \qquad (ج)$$

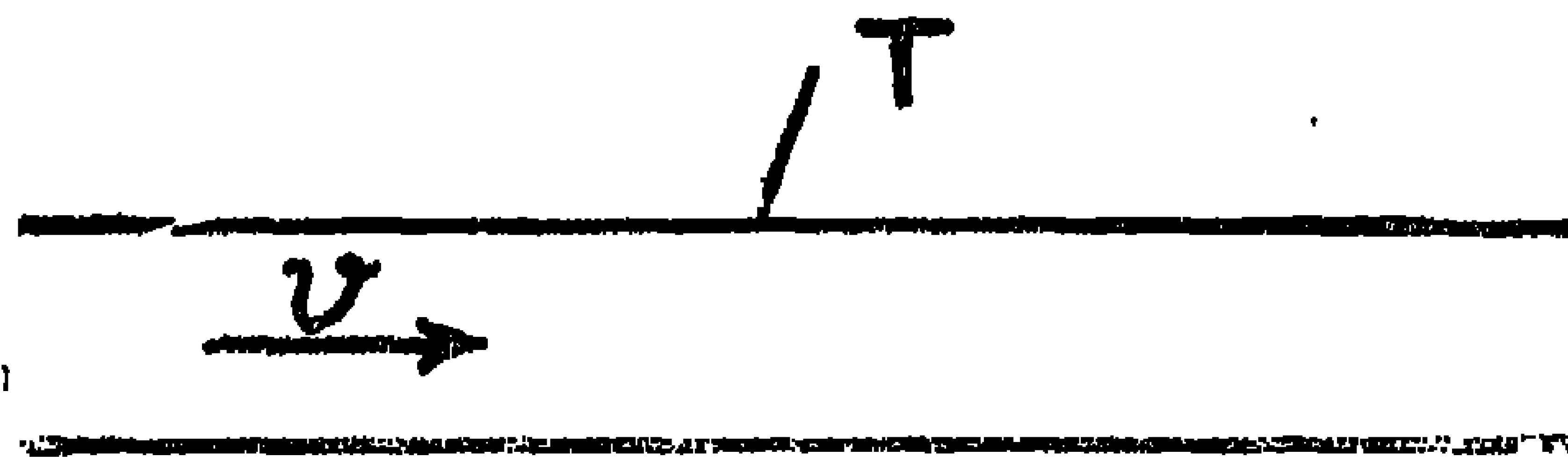
التي تعبر عن نظرية جمع السرع المتفقة في المنحى بالانسجام مع مبدأ النسبية . والآن ، أي من المعادلتين (ب) و (ج) هي الاحسن اتفاقا مع التجربة ؟

وعند هذه النقطة تجلو الموقف لنا تجربة هامة جدا قام بها الفيزيائي اللامع فيزو FIZEAU منذ أكثر من قرن من الزمان ، وقد كرر هذه التجربة عدد من أحسن الفيزيائيين المجربين ، حتى لم يعد هناك أي شك في نتيجتها . تتناول هذه التجربة المسألة التالية :

ضوء يخترق بالسرعة المحددة W سائلا عديم الحركة . لنفرض الآن ان السائل يجري في الانبوب T بالسرعة V (الممثلين على مخطط الشكل٣) باتجاه السهم المرسوم . فما هي عندئذ سرعة الضوء في هذا السائل المتحرك ؟ .

من المفروغ منه ، طبقا لمبدأ النسبية ، **ان انتشار الضوء سيكون دوما بالسرعة W** ، سواء كان السائل ساكنا او متحركا بالنسبة لاي جسم مقارنة آخر .

فسرعة الضوء بالنسبة للسائل وسرعة السائل بالنسبة للانبوب هما، اذن معروفتان ، ونريد ان نعرف سرعة الضوء بالنسبة للانبوب .



الشكل رقم — ٣ —

لقد كنا في الفصل ٦ امام مسألة مماثلة . فالانبوب هنا يقابل زيق السكة هناك اي جملة الاحداثيات K، والسائل هنا يقابل العربة هناك اي جملة الاحداثيات K'، وأخيرا يقابل الضوء هنا الرجل الماشي في العربة هناك او النقطة المتحركة في الفصل الراهن . فاذا رمزنا بـ W لسرعة الضوء بالنسبة للانبوب ، فاننا نستطيع ان نحسب هذه السرعة اما من المعادلة (ب) واما من المعادلة (ج) ، حسبما نستند الى تحويل غاليله او الى تحويل لورنتس . وقد كان أن حكمت التجربة (١) لصالح المعادلة (ج) المشتقة من مبدأ النسبية ، وكان الحكم حاسما ودقيقا .

وبموجب القياسات الحديثة الممتازة التي قام بها زيمان ZEEMAN اتضح ان تأثير سرعة الجريان V على انتشار الضوء يستجيب للمعادلة(ج) بارتياب لايزيد عن واحد في المئة .

على أننا لابد لنا من ان نلفت النظر هنا الى واقع ان نظرية هذهالظاهرة قد أعطاها لورنتس قبل استتباب نظرية النسبية بزمن طويل . بيد اننظرية لورنتس ذات طبيعة كهر حركية صرفة وكان قد تم استنباطها باستعمال فرضيات خاصة بخصوص البنية الكهرطيسية للمادة . بيد ان هذا الامر لاينتقص ، على أية حال ، من قيمة نتيجة التجربة كمحك يحكم لصالحنظرية النسبية ، لان علم التحريك الكهربائي الذي ابتدعه مكسويل MAXWELL ولورنتس ، والذي كانت تستند اليه النظرية الاولية ، لايتناقض بتاتا مع نظرية النسبية . بل ان النظرية الاولية قد نمت بالاحرى من علم التحريك الكهربائي كنتيجة مدهشة لتراكب وتعميم هذه الفرضيات التي كانت في الاصل مستقلة فيما بينها وكانت تشكلاساسا لبناء علم التحريك الكهربائي.

---

(١) ــ لقد وجد فيرو ان $W = w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ حيث $n = \frac{c}{w}$ قرينة انكسار السائل . ومن جهة اخرى ، ونظرا لصغر الكسر $\frac{vw}{c^2}$ أمام الواحد ، يمكن ان نضعصيغة المعادلة (ج) على الشكل $W = (w + v)\left(1 - \frac{vw}{c^2}\right)$ ، او برتبة الحساب التقريبي نفسها ، على الشكل $w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$ الذي يطابق النتيجة التي حصل عليها فيرو .

١٤ – القيمة النفعية لنظرية النسبية

ان القطار الذي تخيلناه في الصفحات السابقة يمكن تلخيصه على النحو التالي .

لقد أقنعتنا التجربة ، من جهة أولى ، ان مبدأ النسبية صحيح ، ومن جهة ثانية ان سرعة انتقال الضوء في الخلاء يجب اعتبارها ثابتة على القيمة C . وبضم هاتين الفكرتين توصلنا الى قانون تحويل بخصوص احداثيات الحادث المتعامدة x و y و z وزمنه t التي تمثل بمجموعها سلوك الطبيعة. وضمن هذه الشروط لم نتوصل الى تحويل غاليله لكننا ، وخلافا لما يقتضيه الميكانيك التقليدي ، توصلنا الى تحويل لورنتس .

ان قانون انتقال الضوء ، الذي تسوغ معارفنا العملية قبولنا به ، يلعب دورا هاما في آلية تفكيرنا . فبعد ان يصبح بحوزتنا تحويل لورنتس يمكن ، في كل الاحوال ، ان نضمه الى مبدأ النسبية وان نوجز النظرية كما يلي :

ان كل قانون طبيعي عام يجب ان يكون مصوغا بحيث يتحول الى قانون له الشكل نفسه عندما ندخل ، بدلا من المتحولات المكانية ــ الزمانية x ، y ، z ، t المنسوبة الى جملة الاحداثيات K ، متحولات مكانية ــ زمانية x' ، y' ، z' ، t' منسوبة الى جملة احداثيات K' . وفي هذا الصدد ترتبط المقادير المفتوحة بالمقادير اللامفتوحة بواسطة تحويل لورنتس . وبمختصر القول نقول : ان قوانين الطبيعة العامة متوافقة التغير (١) بالنسبة لتحويل لورنتس .

---

(١) ــ تعبير رياضي (Covariant) من الواقع الفيزيائي المشروح هذا . (المترجم) .

ان هذا شرط رياضي محدد تتطلبه نظرية النسبية من القانون الطبيعي (التجريبي) ، وبموجبه تصبح النظرية وسيلة ذات قيمة مجدية لدى البحث عن قوانين الطبيعة العامة . فاذا صادفنا قانونا تجريبيا لايحقق هذا الشرط تكون عندئذ احدى فرضيتي النظرية الاساسيتين ، على الاقل ، قد انتقضت. دعونا اذن الآن نفتش عن النتائج العامة التي نبدتها نظرية النسبية .

* * *

١٥ ـ النتائج العامة للنظرية

يتضح من محاكماتنا السابقة ان نظرية النسبية (الخاصة) قد نمت من خلال علمي التحريك الكهربائي والضوء . وفي هذين الحقلين لم تغير النسبية التنبؤات النظرية ، ولكنها بسطت بنيتهما النظرية ، اي طريقة اشتقاق القوانين، كما انها قد اختصرت (وهذا هو وجهها الاهم) الى حد كبير عدد الفرضيات المستقلة التي تشكل اساس هذين العلمين . فنظرية النسبية قد رفعت هذين العلمين الى درجة من المعقولية جعلت نظرية مكسويل ـ لورنتس مقبولة عموما لدى الفيزيائيين حتى ولو كانت الاحكام التجريبية لصالحها مشوبة ببعض الالتبـــاس .

فالميكانيك التقليدي يجب ان يتعدل ، حتى ينسجم مع متطلبات نظرية النسبية ، قبل ان نتمكن من ادخاله في نطاقها . ان هذا التعديل لايتناول ، في قسمه الرئيسي ، سوى القوانين التي تخص السرعات العالية ، اي سرعات المادة v التي تقترب من سرعة النور c . ولدينا اليوم تجارب في هــذا المجال الحركي تتناول الالكترونات فقط . اما من اجل الحركات البطيئة فان الفروق النسبوية عن الميكانيك التقليدي تكون صغيرة لدرجة لايتاح الشعور بها . ونحن لن نفحص حركة النجوم قبل ان نأتي الى نظرية النسبية العامة. هذا وطبقا لنظرية النسبية لم تعد الطاقة الحركية للنقطة المادية التي تملك الكتلة m والسرعة v معطاة بالعبارة المعروفة التقليدية

$$m\frac{v^2}{2}$$

بل بالعبارة النسبوية

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

وقيمة هذه العبارة تصبح لامتناهية في الكبر عندما تقترب السرعة v من سرعة الضوء c . فالسرعة يجب اذن ان تظل اقل من c مهما بلغ عظم الطاقة التي نصرفها لتوليد التسارع . واذا نشرنا عبارة الطاقة الحركية النسبوية هذه على شكل سلسلة نحصل على :

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \ldots$$

فعندما يكون $\frac{v^2}{c^2}$ اصغر من واحد بكثير فان الحد الثالث من هذه السلسلة يصبح دوما صغيرا بالنسبة للحد الثاني الذي هو العبارة المعتمدة في الميكانيك التقليدي . لكن الحد الاول mc^2 لايحوي السرعة ولا يجب أخذه بعين الاعتبار عندما نقتصر على معالجة موضوع كيفية تعلق طاقة النقطة المادية بالسرعة . وسنتكلم عن مغزاه الجوهري فيما بعد .

ان أهم النتائج ذات الصبغة العامة والتي تقود اليها نظرية النسبية الخاصة هي النتيجة التي تخص مفهوم الكتلة . فقبل اكتشاف النسبية كانت الفيزياء تحوي قانوني انحفاظ منفصلين هامين وأساسيين ، وهما قانون انحفاظ الطاقة وقانون انحفاظ الكتلة ، وكان كل من هذين القانونين الاساسيين يبدو مستقلا عن الآخر . بيد ان نظرية النسبية تجمعهما في قانون واحد . وسنشرح الآن باختصار كيف يتم هذا التوحيد وما هو المغزى الذي يجب ان يفهم منه .

ان مبدأ النسبية يتطلب ان يكون قانون انحفاظ الطاقة صحيحا ، لا بالنسبة لجملة الاحداثيات K فحسب بل وأيضا وبالنسبة للجملة K' المتحركة بالنسبة لـ K حركة انسحابية منتظمة ، او باختصار ، بالنسبة لكل جملة احداثيات غاليلية . وتحويل لورنتس هو هنا العامل الحاسم في الانتقال من جملة احداثيات لاخرى .

ومن هذه المقدمات وباجراء محاكمات جد بسيطة نجد انفسنا مقودين الى النتيجة التالية المتصلة بمعادلات مكسويل الاساسية في التحريك الكهربائي :

ان الجسم المتحرك بالسرعة v والذي يمتص كمية E_0 (١) من الطاقة على شكل اشعاع ودون ان يعاني تغييرا في سرعتــه ، تزداد طاقته نتيجة لذلك بالمقدار

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

فاذا أخذنا بعين الاعتبار صيغة طاقة الجسم الحركية الواردة اعلاه فان طاقة الجسم المطلوبة تصبح عندئذ

$$\frac{\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

وهكذا نرى ان الجسم يمتلك طاقــة كجسم متحــرك بالسرعة v وكتلته $\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)$.

وبذلك نستطيع ان نقول : اذا اكتسب جسم الطاقة E_0 فان كتلته العطالية تزداد بالكمية $\frac{E_0}{c^2}$ فالكتلة العطالية للجسم ليست مقدارا ثابتا ولكنها تتغير كما تتغير طاقة الجسم . اي ان الكتلة العطالية لمجموعة اجسام يمكن ان تعتبر قياسا لطاقتها . فقانون انحفاظ الكتلة يصبح عندئذ مطابقــا لقانون انحفاظ الطاقة ، وهو لايصح الا اذا لم تتبادل مجموعة الاجسام المعتبرة مع سواها اية طاقة ، لا عطاء ولا كسبا . واذا كتبنا عبارة الطاقة على الشكل :

$$\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

نرى ان الحد mc^2 ، الذي لفت انتباهنا منذ قليل ، ليس شيئا آخر سوى الطاقة التي كان يمتلكها الجسم قبل ان يمتص الطاقة E_0 (٢) .

ان وضع هذه العلاقة على محك التجربة مباشرة ليس ممكنا في الوقت الحاضر (أي عام ١٩٢٠ ، اقرا الملاحظة في ذيل هذا الفصل) بسبب واقع ان

---

(١) ـ ان E_0 هي الطاقة التي يمتصها الجسم المتحرك كما تبدو من الجملة المتحركة معه .
(٢) ـ كما تقاس في جملة الاحداثيات المتحركة مع الجسم .

التغيرات التي تطرأ على الطاقة E_0 التي يملكها جسم ما ليست كبيرة لدرجة تكفي لكشف التغير الناشيء عنها على الكتلة العطالية للجسم . فـ $\frac{E_0}{c^2}$ صغير جدا اذا قورن بالكتلة m التي كان يملكها الجسم قبل ان تطرا عليه تلك التغيرات . وبسبب هذا الواقع امكن في الميكانيك التقليدي الاثبات التجريبي لاستقلالية قانون انحفاظ الكتلة .

دعوني الآن اضف ملاحظة اخيرة اساسية جدا ، ان نجاح تفسير مكسويل ــ فارادي FARADAY لانتقال الفعل الكهرطيسي الى مسافات بعيدة كان ناجما عن قناعة الفيزيائيين بانه لايوجد شيء يمكن ان نسميه انتقال الفعل آنيا (أي انتقالا لايستلزم أي وسط بين الفاعل والمفعول به) على شاكلة قانون نيوتن في التثاقل . وفي نظرية النسبية ينتفي الفعل الآني عن بعد ، أي انتقال التأثير بسرعة لامتناهية في الكبر ، ليحل محله انتقال الفعل بسرعة الضوء . وهذه النتيجة تتصل بواقع ان السرعة c تلعب دورا رئيسيا في هذه النظرية . وسنرى في القسم الثاني من هذا الكتاب كيف تتعدل هذه النتيجة في نظرية النسبية العامة .

ملاحظة : ان تقدم عمليات التحويل النووية ، الناجمة من رجم نوى الذرة بجسيمات الفا او ببروتونات او بدوتيرونات او بنترونات او باشعة غاما ، قد اثبت التكافؤ بين الكتلة والطاقة كما تنص عليه المساواة $E = mc2$. فمجموع الكتل المتفاعلة مضافا اليه المكافيء الكتلي لطاقة الجسيم الراجم الحركية (او طاقة الفوتون غاما) هو دوما أصغر من مجموع الكتل الناتجة بعد التفاعل . وما الفرق بين هذين المجموعين سوى المكافيء الكتلي للطاقة الحركية التي تأخذها الجسيمات الناتجة في نهاية التفاعل (أو الطاقة الكهرطيسية لفوتونات غاما) وللسبب ذاته يكون مجموع كتل الذرات التي تعاني تفككا نوويا تلقائيا أكبر من مجموع كتل الذرات الناجمة عن التفكك بفرق يكافيء مجموع الطاقات الحركية لشتى الجسيمات المتولدة من التفكك (أو طاقة الفوتونات المتولدة) هذا وان عمليات قياس طاقات الاشعاع الصادر عن التفاعلات النووية بالاضافة الى معادلات التفاعل ، قد مكنت من تقدير الكتل الذرية بدرجة عالية من الدقة . (المترجم الانكليزي) .



١٦ - التجربة ونظرية النسبية الخاصة

الى اي مدى تتفق نظرية النسبية مع التجربة ؟ لايمكن بسهولة الاجابة عن هذا السؤال لاسباب ذكرناها فيما قبل بمناسبة تجربة فيزو الاساسية. فنظرية النسبية الخاصة تبلورت في ظل نظرية مكسويل ـ لورنتس في الظواهر الكهرطيسية . فكل واقع تجريبي يدعم النظرية الكهرطيسية يدعم أيضا نظرية النسبية . وكواقع ذي أهمية خاصة نذكر ان نظرية النسبية تمكننا من ان نتنبأ بالتأثيرات الواقعة على الضوء الواصل الينا من النجوم الثابتة . فهذه النتائج قد تم الحصول عليها بطريقة بسيطة جدا . أما التأثيرات المشار اليها ، والتي تنجم عن حركة الارض بالنسبة للنجوم الثابتة ، فقد ظهرت على وفاق مع التجربة . ونقصد بذلك الحركة السنوية للمواضع الظاهرية للنجوم الثابتة والتي تتأتى من حركة الارض حول الشمس (الزيغ) ، كما نقصد تأثير المركبة الشعية لحركة النجوم هذه بالنسبة للارض على لون الضوء الواصل الينا من هذه النجوم . ان هذا التأثير الاخير يتجلى على شكل انزياح طفيف لخطوط طيف الضوء الواصل الينا من النجوم الثابتة عندما نقارن اوضاع هذه الخطوط بأوضاع الخطوط التي نحصل عليها من منبع ضوئي ارضي (مفعول دوبلر DOPPLER) . ان الادلة التجريبية التي تؤيد نظرية مكسويل ـ لورنتس ، والتي هي في الوقت ذاته ادلة تؤيد نظرية النسبية ، هي أكثر عددا من ان تذكر هنا . انها في الواقع تحد الامكانيات النظرية الى مدى لم تتمكن أية نظرية سوى نظرية مكسويل ـ لورنتس من الوصول اليه عندما توضع على محك التجربة .

على ان ثمة صنفين من الوقائع التجريبية التي ظهرت حتى الآن يمكن ان تتمثل في نظرية مكسويل ـ لورنتس ولكن عن طريق ادخال فرضيات مساعدة،

هي بحد ذاتها — أي بدون استخدام نظرية النسبية — تبدو غريبة عن النظرية .

من المعلوم ان الاشعة المهبطية (الكاتودية) والاشعة المسماة باشعة بيتا الصادرة عن المواد المشعة تتألف من جسيمات مكهربة سلبيا (الكترونات) ذات عطالة صغيرة وسرعة كبيرة . فبدراسة انعطاف هذه الاشعة بتاثير الحقلين الكهربائي والمغنطيسي نستطيع ان ندرس قانون حركة هذه الجسيمات بدقة مضبوطة .

فبالمعالجة النظرية لهذه الالكترونات(١) نواجه صعوبة ان النظرية الكهر حركية ليست بحد ذاتها قادرة على تفسير طبيعتها . فالشحنات الكهربائية التي من اشارة واحدة تتنافر فيما بينها ، وعلى هذا فالشحنات التي تحملها الالكترونات يجب ان تنحرف تحت تأثير تنافرها المتبادل مالم تتدخل فيما بينها قوة من طبيعة أخرى ، وطبيعة هذه القوة ماتزال غامضة في نظرنا . فاذا سلمنا بأن المسافات بين الشحنات الكهربائية لاتتغير اثناء حركة الالكترونات (طبقا لما يقتضيه الميكانيك التقليدي) فسنصل الى قانون حركة للالكترونات لايتفق مع التجربة . لقد كان لورنتس ، مستهديا بوجهة نظر شكلية بحتة ، أول من ادخل فرضية ان شكل الالكترون يعاني تقلصا في منحى الحركة ناجما عن الحركة ، وهذا التقلص متناسب مع $\frac{I}{\sqrt{I-\frac{v^2}{c^2}}}$. لكن هذه الفرضية، التي لايوجد في علم التحريك الكهربائي مايسوغها ، زودتنا آنئذ بذلك القانون الحركي الخاص الذي أيدته التجربة مؤخرا بدقة عالية .

ان نظرية النسبية تقود الى قانون الحركة نفسه دون ان تتطلب اية فرضية خاصة حول بنية الالكترونات وسلوكها . ولقد وصلنا الى نتيجة مماثلة في الفصل ١٣ بخصوص تجربة فيزو ، تلك النتيجة التي ايدتها فيما بعد نظرية النسبية دون ضرورة لادخال اية فرضية فيما يخص طبيعة السائل .

---

(١) — ان نظرية النسبية العامة تشير بما يشبه الوضوح الى ان شحنات الالكترونات تظل مترافقة معا بفضل قوى التثاقل .

أما الصنف الثاني من الوقائع التجريبية التي ألمحنا اليها فيخص مسألة فيما اذا كانت حركة الارض في الفضاء يمكن ان تكشف بواسطة تجارب أرضية . وقد ذكرنا في الفصل (٥) ان كل المحاولات التي تمت في هذا الصدد قد باءت بالفشـــل .

وقد كان هذا الفشل غير قابل للتفسير قبل اكتشاف نظرية النسبيـــة لاسباب نود الآن مناقشتها . فالآراء الموروثة مسبقا بخصوص المكان والزمان لم تكن تسمح باثارة أي شك بالاهمية الكبرى لتحويل غاليله لدى المرور مــن جسم مقارنة الى جسم مقارنة آخر . فاذا قبلنا الآن بأن معادلات مكسويل ــ لورنتس تصح في جملة مقارنة K ، نجد انها لاتصح في جملة مقارنة K' متحركة بانتظام بالنسبة لـ K ، عندما تعتمد تحويل غاليله للمرور من K الى K' . وهذا يعني انه ، من بين كل جمل الاحداثيات الغاليلية ، يوجد جملة واحدة، ذات حالة حركية خاصة ، مقبولة فيزيائيا . وقد فسرت هذه النتيجة فيزيائيا على أساس ان الجملة K ساكنة بالنسبة لوسط افتراضي أطلق عليه اســم اثير الفضاء . وعلى هذا فكل جملة K' متحركة بالنسبة لـ K يجب ان تعتبر في حالة حركة بالنسبة للاثير . وقد عزي لحركة K' خلال الاثير (« ريــح الاثير » (١) بالنسبة لـ K') قوانين شديدة التعقيد يفترض ان تصح بالنسبة لـ K' . وبصريح العبارة يجب ان تكون الكرة الارضية ملفوحة بريح الاثير هذه وقد كرس الفيزيائيون جهودا كبيرة ووقتا طويلا لكشف وجــود ريح أثيرية بالقرب من سطح الارض .

ومن بين المحاولات العديدة في هذا السبيل تخيل مايكلسن MICHELSON طريقة بدت أكثر الطرق ملائمة لحسم الموقف . لنتصور مرآتين مستويتين مثبتتين على جسم صلب بحيث يتقابل سطحاهما العاكسان . فأي شــعاع ضوئي متحرك جيئة وذهابا بينهما سيستغرق زمنا محددا T في عملية ذهاب واياب واحدة بين المرآتين اذا كانت الجملة كلها ساكنة بالنسبة للاثير . أما اذا

---

(١) ــ تشبيها بـ « ريح الهواء » التي تلفح وجه الانسان الذي يركض في هواء ســاكن . (المترجم) .

كان الجسم الصلب والمرآتان تتحرك معا بالنسبة للاثير فان الحساب يدل ، في كل الاحوال ، على ان الشعاع يستغرق في العملية ذاتها زمنا T' مختلفا قليلا عن T . ومن جهة أخرى ، يدل الحساب أيضا ، من أجل سرعة معينة v بالنسبة للاثير ، على ان هذا الزمن T' يختلف عندما تكون حركة الجسم عمودية على مستوى المرآتين عنه عندما تكون هذه الحركة موازية لهما . ورغم ان الفرق بين قيمتي T' هاتين صغير جدا فقد ركب مايكلسن ومورلي MORLAY بعناية تجربة تستغل ظاهرة التداخل الضوئي لكشف هذا الفرق بوضوح . لكن نتيجة التجربة كانت سلبية ، فأوقعت الفيزيائيين في حيرة وذهول . فهرع لورنتس وفيتزجيرالد FITZGERALD لانقاذ النظرية من هذا المأزق بافتراض ان حركة الجسم بالنسبة للاثير تؤدي الى تقلص طوله في منحى الحركة وبالمقدار الضروري بالضبط لتغطية ذلك الفرق الزمني . وبالمقارنة مع المناقشة الواردة في الفصل (١٢) نرى ان نظرية النسبية تقدم هذا الحل ذاته للخروج من ذلك المأزق . لكن طريقة التفسير المستندة الى نظرية النسبية أكثر ارضاء للفكر . فليس في هذه النظرية شيء يمكن ان يسمى جملة احداثيات «مفضلة لذاتها» (وحيدة) تتيح الفرصة لادخال فكرة الاثير ، ولا يمكن بالتالي ان توجد أية ريح أثيرية ولا مايدعو لاختراع تجربة تثبت وجوده . فتقلص أطوال الاجسام المتحركة نابع هنا من مبدأي النظرية الاساسيين دون حاجة لادخال فرضيات خاصة . وكما برز لنا عامل التقلص هذا نجد هنا ، لا الحركة بحد ذاتها التي لانعلق بها أي معنى ، بل الحركة بالنسبة لجسم المقارنة المختار في الحالة الخاصة المستهدفة . فبالنسبة لجملة احداثيات تتحرك مع الارض لاتقصر المسافات بين المرايا في تجربة مايكلسن ومورلي ، بل هي تقصر في جملة احداثيات ساكنة بالنسبة للشمس .

* □ *

١٧ ـ فضاء منكوفسكي ذو الأبعاد الأربعة

ان غير الرياضيين تعتريهم قشعريرة خفية عندما يسمعون كلاما عـن أشياء « ذات اربعة أبعاد » ، وينتابهم شعور لايختلف عن الشعور الذي يسببه التفكير في أشياء السحر . ومع ذلك فلا يوجد قول عن الفضاء المألوف أصح من قولنا اننا نعيش في متصل مكاني ـ زماني ذي أربعة أبعاد .

ان الفضاء متصل ذي ثلاثة أبعاد . وهذا القول يعني امكانية توصيف وضع نقطة ما (ساكنة) بواسطة ثلاثة أعداد (احداثيات) x و y و z ، كما يعني انه يوجد ، في جوار تلك النقطة ، عدد غير محدود من النقاط التي يمكن تحديد مواضعها باحداثيات ، x_1 و y_1 و z_1 ، يمكن ان تكون قريبة قدر مانريد من قيم الاحداثيات x و y و z التي تحدد مكان النقطة الاولى . وبفضل هذه الخاصة الاخيرة نتكلم عن « المتصل » ، وبسبب وجود ثلاثة احداثيات نقول ان هذا المتصل « ثلاثي الابعاد » .

ولاسباب مماثلة فان عالم الظواهر الفيزيائية الذي اسماه منكوفسكي باختصار « العالم » هو بالطبع « رباعي الابعاد » بالمعنى المكاني ـ الزماني . لانه يتألف من حوادث فردية يتعين كل منها بأربعة اعداد . ثلاثة منها احداثيات مكانية x و y و z ، والرابع احداثي زمني هو قيمة الزمـن t . فـ «العالم» بهذا المعنى هو متصل أيضا،لانه يوجد لكل حادث عدد غير محدود من الحوادث « المجاورة » (التي وقعت أو على الاقل ممكنة الوقوع) التي يمكن تحديد مواضعها مكانيا ـ زمانيا بأربعة احداثيات x_1 و y_1 و z_1 و t_1 لاتختلف الا بكميات صغيرة عن الاحداثيات x و y و z و t التي تحدد مكان ـ زمان الحادث الاولي . هذا وان عدم اعتيادنا على ادراك العالم بهذا المعنى ، كمتصل رباعي الابعاد ، ناشيء عن واقع ان الزمن كان يلعب ، في

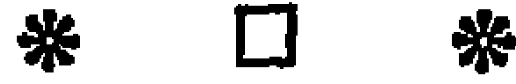
الفيزياء وقبل اكتشاف نظرية النسبية ، دورا مستقلا ومختلفا عن الدور الذي تلعبه الاحداثيات المكانية . ولهذا السبب تعودنا على معاملة الزمن كمتصل مستقل . وواقع الامر ان الزمن ، في عرف الميكانيك التقليدي ، كائن مطلق ، اي انه مستقل عن وجود جملة الاحداثيات وعن ظروف حركتها . وهذا ماتعبر عنه المعادلة الاخيرة من تحويل غاليله ($t'=t$) .

ان المحاكمة في « العالم » الرباعي الابعاد عملية طبيعية في نظريةالنسبية، لان الزمن قد سلب استقلاله في هذه النظرية .وهذا واضح في المعادلة الرابعة لتحويل لورنتس

$$t'=\frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

وفوق ذلك فان الفرق الزمني $\Delta t'$ بين حادثين ، بالنسبة لـ K' . وبموجب هذه المعادلة ، لاينعدم عموما ، حتى ولو انعدم الفارق الزمني Δt بين هذين الحادثين بالنسبة لـ K فـ « المسافة ــ المكانية » البحتةفيالجملة K بين الحادثين تصبح « مكانية ــ زمانية » بالنسبة للجملة K' .لكناكتشاف منكوفسكي ، على أهميته في التطور الشكلي لنظرية النسبية ، لايكمن هنا .بل يجب بالاحرى البحث عنه في واقع انه يعترف ان المتصل المكاني ــ الزماني الرباعي الابعاد في نظرية النسبية ، في اكثر خواصه الشكلية اساسية ، يظهر علاقة بارزة بالمتصل الثلاثي الابعاد في فضاء الهندسة الاقليدية . ولكي نعطي هذه العلاقة ماتستحق من تقدير علينا ، في كل الاحوال ، ان نبدل الاحداثي الزمني المعروف (t) بمقدار تخيلي ، $\sqrt{-1}\,.\,ct$ متناسب معه . وضمن هذه الشروط تكتسب القوانين الطبيعية التي تنسجم مع متطلبات نظرية النسبية (الخاصة) أشكالا رياضية يلعب فيها الاحداثي الزمني الدور نفسه الذي يلعبه في الفضاء الثلاثي الابعاد . فمن الناحية الشكلية ، تقابل هذه الاحداثيات الاربعة هنا احداثيات المكان الثلاثة في الهندسة الاقليدية . ومن الواضح حتما ، حتى لغير الرياضيين ، ان هذه الاضافة الشكلية البحتة الى معارفنا قد اكسبت النظرية وضوحا لايقدر .

ان هذه الملاحظات المقتضبة يمكن ان تعطي القارىء مجرد المام غامض عن الفكرة الهامة التي أسهم بها منكوفسكي . فمن المحتمل ان نظرية النسبية العامة ، التي سنشرح أفكارها الرئيسية في الصفحات القادمة ، لن تكتسي بدون هذا الاسهام أكثر من ثوبها الفضفاض . ومما لاشك فيه ان أعمال منكوفسكي عسيرة الادراك على من ليس لديه خبرة في الرياضيات ، ولكن بما أن فهم الافكار الاساسية لنظريتي النسبية ، الخاصة والعامة ، لايستلزم الاحاطة التامة بهذه الاعمال فسنتركها الآن مؤقتا ولن نعود اليها الا في نهاية القسم الثاني من هذا الكتاب .



القسم الثاني

نظرية النسبية العامة

١٨ - مبدأ النسبية الخاص والعام

ان المبدأ الاساسي الذي تمحورت عليه محاكماتنا السابقة كان مبدأ النسبية **الخاص** ، اي مبدأ النسبية الفيزيائي الخاص بالحركة المنتظمة . لنتفحص مرة أخرى مضمونه باتقان .

لقد كان واضحا دوما ، من خلال الفكرة التي توجهنا ، ان كل حركة يجب ان تعتبر حركة نسبية فقط . وبالعودة الى الايضاح التفسيري الذي كنا نستخدمه مرارا ، أي زيق السكة وعربة القطار ، يمكن ان نعبر هنا عن الواقع الراهن لهذه الحركة بالشكلين التاليين ، المتساويين في التبرير :

آ ـ ان العربة في حالة حركة بالنسبة للزيق .

ب ـ ان الزيق في حالة حركة بالنسبة للعربة .

ان العربة (في آ) والزيق (في ب) يخدمان كجسم مقارنة في كلامنا عن الحركة الراهنة . فاذا كانت المسألة مسألة كشف الحركة المستهدفة أو توصيفها فحسب ، فلا أهمية مبدئيا لتحديد جسم المقارنة الذي ننسب اليه الحركة . وهذا ، كما ذكرنا منذ قليل ، واضح من تلقاء ذاته ولكن يجب ان لانخلط بينه وبين مايسمى « مبدأ النسبية » الذي هو أوسع شمولا ، والذي اتخذناه كأساس في تحرياتنا .

ان المبدأ الذي استخدمناه لايؤكد فقط ان لافرق بين اختيار العربة وبين اختيار الزيق كجسم مقارنة في توصيف اي حادث (فهذا أيضا واضح من تلقاء ذاته) . لكن مبدأنا هذا يؤكد بالاحرى مايلي : اذا صغنا قوانين الطبيعة العامة ، كما نحصل عليها من التجربة ، باستخدام :

آ ـ الزيق كجسم مقارنة .

ب ـ عربة القطار كجسم مقارنة .

فان القوانين العامة هذه (كقوانين الميكانيك وقانون انتشـار الضوء في الخلاء) تأخذ الشكل نفسه في كلتا الحالين . وهذا مايمكن التعبير عنه أيضا كما يلي : ان أيا من جسمي المقارنة K و K' لاينفرد بأية ميزة عـن الآخر (قل « لايتمتع بأفضلية خاصة ») لدى التوصيف **الفيزيائي** لمجريات الحوادث الطبيعية . ان هذه المقولة الاخيرة ، بخلاف الاولى ، ليست بالضرورة مقبولة سلفا ، انها غير محتواة في مفهومي « الحركة » و « جسم المقارنة » ولا يمكـن استنباطها منهما ، لكن التجربة وحدها هي الكفيلة بتأكيد صحتها أو نفيها .

ونحن ، على كل حال ، لم نؤكد بتاتا حتى الآن تكافؤ **جميـع** أجسـام المقارنة K ازاء صياغة القوانين الطبيعية . فاهتمامنا كان ينصب على الامور التالية . انطلقنا ، قبل كل شيء من افتراض انه يوجد جسم مقارنة K **تجعل** ظروفه الحركية قانون غاليله صحيحا بالنسبـة له : أي ان الجسيم المتروك لشأنه والبعيد بعدا كافيا عن اي جسيم آخر يتحرك بانتظام في خط مستقيم . فقوانين الطبيعة بالنسبة لـ K (جسم مقارنة غاليلي) لابد ان تكون ابسـط مايمكن . لكن كل أجسام المقارنة K' ، بالاضافة لـ K ، لابد ان تعطى الافضلية ذاتها ولا بد ان تكون مكافئة لـ K ازاء صياغة قوانين الطبيعة ، شرط أن تكون في حالة **حركة مستقيمة غير دوارة** بالنسبة لـ K . فكل اجسام المقارنة هذه يجب ان تعتبر أجسام مقارنة غاليلية . ولا تقوم صحة مبدأ النسبية الا من أجل أجسام المقارنة هذه لاسواها من الاجسام (التي تقوم بحركة من نوع آخر) . وبهذا المعنى نتكلم عن مبدأ النسبية **الخاص** ، او نظرية النسبية الخاصة .

وفي غير ذلك نرغب في فهم « مبدأ النسبية العام » على أنه المقولة التالية : ان كل أجسام المقارنة K ، K' الخ .. متكافئـة في توصيف الظواهـر الطبيعية (صياغة قوانين الطبيعة العامة) مهما كانت حالتها الحركية . ولكننا قبل أن نذهب الى ابعد من هذا نلفت النظر الى اننا سنستبدل بهذا النص فيما بعد صياغة أكثر تجريدا ، لاسباب ستتضح في مرحلة لاحقة .

هذا وبعد ان اتضحت ضرورة ادخال مبدأ النسبية الخاص ، فان الذهن الذي يسعى نحو التعميم لابد ان تستهـويه المغامرة لتخطى ذلـك الى مبدأ النسبية العام . لكن محاكمة بسيطة موثوقة في الظاهر تماما قد توحي ، في الوقت الحاضر على الاقل ، ان الامل ضعيف في النجاح في محاولة مـن هـذا القبيل . لنتصور أننا قد انتقلنا الى داخل صديقتنا القديمة ، عربة القطـار التي تسافر بسرعـة منتظمة . فالمسافر لن يتحسس بحركتها طالما ظلت هذه الحركة منتظمة ، وذلك هو السبب الذي يبيح له أن يفسر واقع هـذه الحال بأن العربة ساكنة وان الزيق هو الذي يتحـرك . وهـذا التفسير له مايسوغه تماما بموجب مبدأ النسبية الخاص ومن وجهة نظر فيزيائية . فاذا أصبحت الآن حركة العربة غير منتظمة ، كأن نلجمها بشدة بواسطة الكوابح فان القاطن في العربة سيعاني انقذافا نحو الامام . أي ان الحركة المتباطئـة للاجسام (القطار) تتجلى في السلوك الميكانيكي للقاطنين في عربة القطار . فهذا السلوك يختلف عما كان عليه في الحالة السابقة ، وعلى هذا يبدو من المستحيل ان تنطبق قوانين الميكانيك داخل العربة ذات الحركة اللامنتظمة كما كانت تنطبق على العربة الساكنة او المتحركة بانتظام . فمن الواضح ، في كل حادث ، ان قانون غاليله غير صحيح بالنسبة للعربة ذات الحركة اللامنتظمة . وبسبب هذا الواقع نجد أنفسنا مضطرين لان نعتبر الحركة اللامنتظمة نوعا من الحقيقة الفيزيائية المطلقة لدى مواجهة مبدأ النسبية العام . لكننا سنرى قريبا فيما يلي أن هذه النتيجة لايمكن الاحتفاظ بها .

* □ *

١٩ – حقل التثاقل

« عندما نلتقط حجرا ثم نتركه لشأنه ، لماذا يسقط نحو الارض ؟ ان الجواب المألوف عن هذا السؤال هو : « لان الارض تجذبه » . لكن الفيزياء الحديثة تصوغ الجواب بشكل مختلف نوعا ما ، للسبب التالي . لقد تعودنا، كنتيجة لدراسة الظواهر الكهرطيسية بامعان ، على ان نعتبر الفعل عن بعد عملية مستحيلة دون تدخل وسط مايصل الفاعل بالمفعول به . ففي ظاهرة جذب المغنطيس لقطعة الحديد ، مثلا ، لايمكننا ان نرضى بتفسير هذه الظاهرة على أساس ان المغنطيس يؤثر مباشرة على الحديد عبر الفضاء الخالي بينهما، لكننا مضطرون – على طريقة فارادي – الى ان نتصور ان المغنطيس يخلق ، في الفضاء المحيط به ، شيئا فيزيائيا حقيقيا ، وهذا الشيء هو مانسميه « حقلا مغنطيسيا » . وهذا الحقل يؤثر بدوره على قطعة الحديد ، مما يجعلها تسعى للتحرك نحو المغنطيس . ونحن لن نناقش هنا تبرير هذا المفهوم الطارىء الذي هو في حقيقة الامر ، اعتباطي نوعا ما . ولكننا نكتفي بالاشارة الى ان الظواهر الكهرطيسية يمكن ان تتمثل بشكل أفضل بواسطته منها بدونه . وهذا القول ينطبق خصوصا على انتقال الامواج الكهرطيسية . وينظر أيضا الى افعال التثاقل بنظرة مماثلة .

ان فعل الارض بالحجر يتولد بأسلوب لامباشر . فالارض تخلق حولها حقلا تثاقليا يفعل في الحجر ويسبب حركة سقوطه . وشدة هذا الفعل على الجسم ، كما نعلم من التجربة ، تتناقص وفق قانون معين تماما عندما يكون الحجر أكثر فأكثر بعدا عن الارض وهذا يعني ، في وجهة نظرنا ، ان القانون الذي يتحكم في خواص الحقل المكانية لابد ان يكون قانونا معينا تماما كي يمثل،

تمثيلا صحيحا : تناقص فعل التثاقل لدى ازدياد البعد عن الاجسام الفاعلة. انه شيء كهذا :

ان الجسم (الارض مثلا) يولد مباشرة حقلا في جواره القريب ، ان شدة هذا الحقل ومنحاه ، في نقاط بعيدة عن الجسم الفاعل ، تتعينان بالقانون الذي يتحكم في الصفات المكانية لحقول التثاقل نفسها هناك .

هذا وان مايميز الحقل التثاقلي عن الحقلين ، الكهربائي والمغنطيسي ، هو أن حقل التثاقل يتمتع بخاصية مميزة ذات أهمية أساسية فيما سنقوله عنه . وهذه الخاصية هي :

ان الاجسام المتحركة بفعل حقل التثاقل وحده تكتسب **تسارعا لايتعلق بتاتا بنوع مادة الجسم ولا بحالته الفيزيائية** . فقطعة من الرصاص ، مثلا ، وقطعة من الخشب تهبطان بأسلوب واحد تماما في حقل تثاقلي **(في الخلاء)** عندما تنطلقان ، معا ، من حالة السكون او بسرعة بدئية واحدة . ان هذا القانون ، المحقق بدقة عالية ، يمكن التعبير عنه بشكل آخر في ضوء الاعتبارات التاليـة .

لدينا ، بموجب قانون نيوتن في الحركة

(القوة) = (الكتلة العطالية) × (التسارع)

حيث « الكتلة العطالية » ثابت مميز للجسم المتسارع . واذا كان التثاقل مسبب هذه الحركة نحصل على

(القوة) = (الكتلة الثقالية) × (شدة الحقل التثاقلي)

حيث «الكتلة الثقالية» هي أيضا ثابت مميز للجسم . ومن هاتين المعادلتين ينتج :

$$(\text{التسارع}) = \frac{(\text{الكتلة الثقالية})}{(\text{الكتلة العطالية})} \times (\text{شدة الحقل التثاقلي})$$

والآن ، اذا كان التسارع ، بموجب مايستدل من التجربة ، مستقلا عن طبيعة الجسم وعن حالته الفيزيائية وواحدا في حقل تثاقلي معين فان حاصل قسمة الكتلة الثقالية على الكتلة العطالية لابد ان يكون واحدا من اجل أي جسم . فاذا أحسنا اختيار واحدات قياس لهاتين الكتلتين تجعل حاصل القسمة هذا مساويا الرقم ١ (واحد) نحصل على القانون التالي : ان كتلة الجسم **الثقالية** تساوي كتلته **العطالية** .

ان هذا القانون الهام مؤكد ، حتى اليوم ، في علم الميكانيك ، لكنه مازال يفتقر الى **التفسير** . بيد أننا لايمكن ان نحصل على تفسير مرض الا اذا اعترفنا **بالحقيقة التالية : ان خاصية الجسم التي تتجلى تارة كـ « عطالة » هي نفس** الخاصية التي تتجلى كـ « وزن » (أو كـ « ثقل ») تارة أخرى . وسنرى في الفصل القادم الى أي مدى تصح هذه المقولة وكيف ترتبط هذه المسألة **بمسلمة النسبية العامة** .



٢٠ التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية كدليل على مسلمة النسبية العامة

نتصور حيزا كبيرا من الفضاء الخالي بعيدا ، عن اي نجم وعن اية كتلة مادية ، لدرجة أننا يمكن ان نعتبر انفسنا تقريبا في الظروف التي يتطلبها قانون غاليله الاساسي . يمكننا عندئذ ان نختار جسم مقارنة غاليلي لهذا الحيز من الفضاء (من العالم) تبقى النقاط الساكنة بالنسبة اليه ساكنة والنقاط المتحركة مستمرة دوما في حركة مستقيمة منتظمة . لنتصور ، كجسم مقارنة ، صندوقا كبيرا يشبه غرفة وفي داخله راصد مع أجهزة قياس . لايوجد طبعا تثاقل بالنسبة لهذا الراصد ، ويجب عليه ان يثبت نفسه على الارض بالحبال ، والا فان اضعف صدمة على أرض الصندوق تجعل الراصد يرتفع ببطء نحو سقف الصندوق .

هذا ويوجد في وسط السطح الخارجي للسقف كلاب مربوط به حبل . لنفترض ان « كائنا » (ان نوع هذا الكائن لايهمنا) يبدأ بشد الحبل بقوة ثابتة ، ويبدأ الصندوق مع الراصد بالحركة « نحو الاعلى » متسارعا بانتظام . وبمرور الزمن ستبلغ السرعة قيما مذهلة ، عندما ننظر الى الصندوق من جسم مقارنة آخر لايجره الحبل .

لكن كيف يشعر الراصد في الصندوق بهذه العملية ؟ ان تسارع الصندوق سينتقل اليه بفضل رد فعل ارض الصندوق ، وعليه عندئذ ان يتحمل هذا الضغط بساقيه اذا شاء ان يتجنب الانهيار نحو أرض الصندوق . فهو اذن في حال مماثلة تماما لحال اي انسان في غرفة منزل قائم على سطح الارض . فلو ترك لشأنه جسما حرا كان يمسكه بيده ، فان تسارع الصندوق لن ينتقل

الى هذا الجسم ، مما يجعل هذا الجسم يقترب من قعر الصندوق بحركة نسبية متسارعة . وعندئذ سيتأكد الراصد ان **تسارع الجسم نحو أرض الصندوق ثابت على قيمة واحدة مهما كان نوع الجسم الذي يستعمله في هذه التجربة .**

هذا واذا قارن الراصد نتيجة هذه التجربة بما يعرفه عن حقل التثاقل (كما شرحناه في الفصل السابق) فسيصل الرجل الى الاعتقاد بأن حقلا تثاقليا ، ثابت الشدة بمرور الزمن ، يسود في الصندوق . هذا ولا شك انه سيحتار في بادىء الامر في تعليل ان الصندوق لايهبط في الحقل التثاقلي هذا. لكنه ، على كل حال ، سيكتشف الكلاب في وسط السقف والحبل المربوط به ، وسيصل في نهاية الامر الى نتيجة ان الصندوق معلق ساكنا في حقل تثاقلي.

هل يحق لنا أن نهزأ من الرجل وان نقول انه قد اخطأ في استنتاجه ؟ انني لا أعتقد أنه يحق لنا ذلك اذا أردنا ان نكون منصفين ، بل ان من الحري بنا ان نقبل ان طريقته في تحليل الموقف لاتتناقض مع العقل ولا مع قوانين الميكانيك المعروفة . فبالرغم من ان الصندوق في حالة تسارع بالنسبة لـ « الفضاء الفاليلي » المعتمد في البدء ، نستطيع ان نعتبره في حالة سكون . وبذلك نحصل على أساس لتوسيع دائرة مبدأ النسبية حتى يضم أجسام المقارنة المتسارعة بعضا بالنسبة لبعض ، وكنتيجة لذلك نكتسب دليلا قويا على مسلمة نسبية شاملة .

هذا ويجب ان نلاحظ بعناية ان امكانية هذه الطريقة في التفسير تعتمد على الخاصة الاساسية للحقل التثاقلي التي تمنح كل الاجسام تسارعا واحدا أو ، وهذا يعود الى ذاك ، على قانون التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . فلولا وجود هذا القانون الطبيعي لما تمكن الرجل في الصندوق المتسارع من تفسير سلوك الاجسام حوله على أساس افتراض حقل تثاقلي ولما كان له الحق ، بالاعتماد على تجربته ، في ان يفترض جسم مقارنته في « حالة سكون » .

لنفترض أن الرجل في الصندوق قد علق حبلا في السقف الداخلي وانه

علق جسما في طرفه السائب. ونتيجة لذلك سيتوتر الحبل بحيث يبقى متدليا « شاقوليا » نحو الاسفل . فاذا طلبنا رأي الرجل في سبب هذا التوتر سيجيب : « ان الجسم المعلق بالحبل يعاني قوة شد نحو الاسفل في الحقل التثاقلي ، وهذه القوة تتعادل مع توتر الحبل ، ان مايحدد قيمة توتر الحبل هي **الكتلة الثقالية** للجسم المعلق » . ولو سألنا راصدا موجودا في الفضاء الحر خارج الصندوق عن رايه في الموضوع لأجاب : «ان الحبل يجب بالضرورة ان يساهم في حركة الصندوق المتسارعة وان ينقل هذه الحركة الى الجسم المعلق به ، فتوتر الحبل يكفي بالضبط لاعطاء الجسم هذا التسارع . وان مايحدد قيمة توتر الحبل هي **الكتلة العطالية** للجسم المعلق . » واستدلالا بهذا المثال نرى ان توسيع مجال مبدأ النسبية يتضمن **بالضرورة** قانون تساوي الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . وبذلك نكون قد حصلنا على تفسير فيزيائي لهذا القانون .

ومن هذه المحاكمة في شأن الصندوق المتسارع ندرك ان نظرية النسبية العامة لابد ان تعطي نتائج هامة بخصوص قوانين التثاقل . وواقع الامر ان الملاحقة المنهجية لفكرة النسبية العامة قد قادت الى القوانين التي تحكم الحقل التثاقلي . وعلى كل حال وقبل ان نذهب الى ابعد من ذلك ، يجب ان أحذر القارىء من فهم خاطىء قد توحي به هذه المحاكمات . فالحقل التثاقلي موجود لدى الرجل في الصندوق بالرغم من واقع انه لم يكن يوجد حقل من هذا القبيل في جملة الاحداثيات المختارة أولا ، والآن نستطيع بسهولة ان نفترض ان وجود الحقل التثاقلي ليس سوى وجود **ظاهري** . كما يمكن ان نفكر ، بصرف النظر عن نوع الحقل التثاقلي الذي سيظهر ، اننا نستطيع دوما ان نختار جسم مقارنة آخر لايوجد حقل تثاقلي بالنسبة له . ان هذا القول لاينسحب بتاتا على اي حقل تثاقلي بل وحصرا على حقول ذات شكل خاص معين . فمن المستحيل مثلا ايجاد جسم مقارنة يتلاشى بالنسبة له حقل التثاقل الارضي (بمجمله كله) .

هذا ويمكن الآن ان نحلل الدليل الذي سقناه في نهاية الفصل ١٨ ضد

نظرية النسبية العامة كي نعلم لماذا لم يكن مقنعا . فمن الصحيح المؤكد ان القاطن في عربة القطار يعاني اندفاعا نحو الامام نتيجة لجم الحركة بالكوابح ، وبذلك يشعر بعدم انتظام (بتباطؤ) حركة العربة . ولكن لا أحد يجبره على عزو هذا الاندفاع الى تسارع (تباطؤ) « حقيقي » للعربة . اذ يستطيع ايضا ان يفسر ذلك كما يلي : « ان الجسم الذي اتخذه جسم مقارنة (العربة) مازال في حالة سكون . ولكن يوجد (أثناء فترة كبح الحركة) بالنسبة له حقل تثاقلي نحو الامام متغير بمرور الزمن . وبتأثير هذا الحقل يتحرك الزيق مع الارض حركة لامنتظمة بحيث تجعل السرعة البدئية المتجهة الى الوراء تتضاءل باستمرار » .



٢١ - ما هو السبب الذي يجعل أسس الميكانيك التقليدي ونظرية النسبية الخاصة غير مرضية

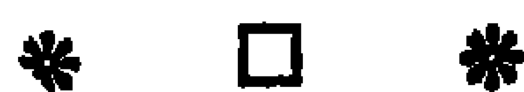
لقد ذكرنا مرارا ان الميكانيك التقليدي ينطلق من القانون التالي : ان الجسيمات المادية البعيدة بعداً كافيا عن اية جسيمات مادية تستمر متحركة بانتظام في خط مستقيم او تظل في حالة سكون . ولقد الححنا مرارا على ان هذا القانون الاساسي لا يصح الا من اجل اجسام مقارنة (K) تتمتع بحالات حركية خاصة وتتحرك ، بعضا بالنسبة لبعض ، حركة انسحابية منتظمة . اما بالنسبة لأجسام مقارنة اخرى (K') فالقانون غير صحيح . فنحن اذن نفرق ، سواء في الميكانيك التقليدي او في نظرية النسبية الخاصة ، بين اجسام مقارنة K نستطيع ان نقول ان « قوانين الطبيعة » المعترف بها صحيحة بالنسبة لها ، وبين اجسام مقارنة لا تصح هذه القوانين بالنسبة لها .

لكن ما من احد ذي تفكير منطقي يستطيع ان يرضى بهذا الامر . فهو يسأل : « كيف يعقل ان تتمتع بعض اجسام المقارنة (او ظروفها الحركية) بافضلية على سواها من اجسام المقارنة (او ظروفها الحركية) ؟ **ما هو سبب هذه الافضلية ؟** » ولكي نشرح بوضوح مايعنيني هذا السؤال نستخدم التشبيه التالـي :

اقف امام موقدي غاز متجاورين ، وعلى كل موقد وعاء معدني يماثل الآخر لدرجة اننا يمكن ان نخلط بينهما . وكل وعاء مملوء بالماء حتى نصفه . الاحظ ان الوعاء الاول يصدر بخارا باستمرار ، دون ان يصدر شيء عن الثاني . فاندهش لذلك ، لانني لم أر قط موقدا ولا وعاء . لكنني الاحظ بعدئذ ان شيئا مضيئا ازرق اللون موجود تحت الوعاء الاول ، فتزول دهشتي ،

ولو لم اكن قد رأيت لهب غاز من قبل . لانني استطيع عندئذ ان اقول ان الشيء الازرق هو الذي يتسبب في صدور البخار ، او ، على الاقل ، قـد يكون هـو السبب . لكنني لو كنت لم الاحظ الشيء الازرق تحت اي من الوعائين ، وكان البخار يخرج من احد الوعائين دون الآخر ، فسابقى على دهشتي وحيرتي حتى اكتشف شيئا اعزو اليه اختلاف تصرف احد الوعائين عن تصرف الآخر .

وتشبيها بذلك ، أبحث دون جدوى عن شيء حقيقي في الميكانيك التقليدي (او في نظرية النسبية الخاصة) أستطيع ان أعزو اليه اختلاف سلوك الاجسام منسوبا الى جملة المقارنة (K) عن سلوكها منسوبا الى (K′) (١) . لقد شعر نيوتن بهذا الاعتراض وحاول ان يفنده ، لكنه اخفق . لكن ا. ماخ (E. MACH) كان اول من ادركه بوضوح ، وبسبب هذا الاعتراض صرح بأن علم الميكانيك يجب ان يعاد بناؤه على اسس جديدة . ان هذا الاعتراض لا يمكن الخلاص منه الا بفيزياء تنسجم مع مبدأ النسبية العام ، لان معادلات مثل هذه النظرية تصلح في اي جسم مقارنة مهما كانت حالته الحركية .



(١) ـ ان هذا الاعتراض تبرز اهميته عندما تكون الحالة الحركية لجسم المقارنة ذات طبيعة لاتحتاج لاي وسيط خارجي يسمح باستمرارها ، كحالة كون جسم المقارنة دوارا بانتظام .

٢٢ ـ بعض الاستنتاجات من مبدأ النسبية العام

ان المحاكمة التي سقناها في الفصل ٢٠ تظهر ان مبدأ النسبية العام يتيح لنا ان نجد خواص الحقل التثاقلي بأسلوب نظري بحت . لنفترض مثلا اننا نعرف « السير » المكاني ــ الزماني لكل عملية طبيعية مهما كانت ، اي الاسلوب الذي تتخذه في المجال الغاليلي بالنسبة لجسم مقارنة غاليلي (K) . فبواسطة اجراءات نظرية بحتة (بالحساب مثلا) نستطيع ان نجد كيف تظهر هذه العملية الطبيعية المعروفة ، من جسم مقارنة (K′) متسارع بالنسبة لـ (K) ولكن ، بما انه يوجد حقل تثاقلي بالنسبة لجسم المقارنة الجديد هذا (K′) ، فان محاكمتنا تعلمنا ايضا كيف يؤثر الحقل التثاقلي في العملية المدروسة .

فنحن نعلم مثلا ان الجسم المتحرك ، بالنسبة (K) ، حركة مستقيمة منتظمة (طبقا لقانون غاليله) يقوم بحركة متسارعة ، ومنحنية عموما ، بالنسبة لجسم المقارنة المتسارع (K′) (الصندوق) . وهذا التسارع ، او الانحناء، الذي يعانيه الجسم المتحرك ناجم عن الحقل التثاقلي السائد في الجملة K′ . لكن من المعلوم ان الحقل التثاقلي يؤثر في حركة الاجسام بهذه الطريقة ، مما يجعل محاكمتنا غير ذات فائدة اساسية جديدة .

لكننا نحصل على نتيجة اساسية جديدة عندما نقوم بمحاكمة مماثلة على شعاع ضوئي . فبالنسبة لجسم مقارنة غاليلي (K′) ، ينتقل هذا الشعاع في خط مستقيم بالسرعة (C) . ويمكن ان نبرهن بسهولة على ان مسار الشعاع نفسه لا يظهر مستقيما عندما ننظر اليه من الصندوق

المتسارع (جسم المقارنة K') . ومن ذلك نستنتج **ان الشعاع الضوئي ينتشر عموما وفق خط منحن في حقل تثاقلي** . وهذه النتيجة هامة من جهتين .

فمن جهة اولى ، يمكن ان نضعها على محك الواقع . فبرغم ان الفحص المفصل لهذه المسألة يظهر ان انحناء الاشعة الضوئية الذي تتنبأ به نظرية النسبية العامة مفرط في الصغر في الحقول التثاقلية المتاحة لنا عمليا ، الا انه يقدر بـ ١٫٧ ثانية قوسية من اجل اشعة ضوئية ترد الينا ماسة لحافة الشمس . وهذا الانحناء يمكن كشفه بالطريقة التالية : يوجد في السماء نجوم ثابتة تبدو من الارض قريبة جدا من الشمس ، مما يمكننا من رصدها اثناء كسوف كلي للشمس . ففي هذه المناسبة يجب ان تظهر مواقع هذه النجوم منحرفة بعيدا عن الشمس بالمقدار المذكور آنفا ، وذلك عن مواقعها عندما تكون الشمس في موضع آخر من السماء . ان التحقق من صحة او عدم صحة هذا الاستنتاج مسألة من الاهمية بمكان ، نتوقع من الفلكيين ان يحسموها في أقرب وقت(١) .

ومن وجهة ثانية ، تدل نتائجنا ، بموجب نظرية النسبية العامة ، ان قانون ثبات سرعة الضوء في الخلاء ، وهو احد افتراضينا الاساسيين في نظرية النسبية الخاصة والذي استندنا عليه مرارا ، لن يعود ذا صلاحية عامة . فانحناء الشعاع الضوئي لا يمكن ان يحدث الا اذا تغيرت سرعة انتشار الضوء بتغير الموضع . وعلى هذا الاساس قد نظن ان نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية برمتها يجب ان تلقيا في سلة المهملات . لكن حقيقة الامر ليست كذلك . فكل ما يمكن ان نستخلصه هو ان نظرية النسبية الخاصة لا يمكن ان تدعي لنفسها صلاحية عامة . اي ان نتائجها لاتصح الا اذا استطعنا ان نضرب صفحا عن تأثير الحقول التثاقلية على الظاهرة (اي على الضوء) .

---

(١) ـ ان وجود هذا الانحراف الذي تنبأت به النظرية قد تأكد لاول مرة في الصور التي التقطتها اللجنة المشتركة للجمعية الملكية وللجمعية الفلكية الملكية وذلك اثناء كسوف ٢٩ أيار ١٩١٩ (انظر الملحق ٣) .

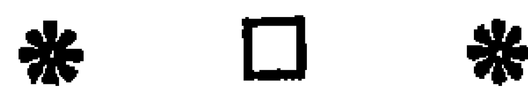
وبما ان معارضي نظرية النسبية يصرون على ان نظرية النسبية العامة قد نبذت نظرية النسبية الخاصة فقد يكون من المفيد ان نوضح واقع هذا الامر بتشبيه ملائم . فقبل تقدم علم التحريك الكهربائي كانت قوانين الكهرباء الراكدة تبدو انها هي قوانين الكهرباء . لكننا نعلم اليوم ان الحقول الكهربائية لا يمكن ان تستخلص بدقة من محاكمات كهربائية راكدة الا في حالة يتعذر تحقيقها بالضبط ، وهي عندما تكون الشحنات الكهربائية ساكنة بعضا بالنسبة لبعض وبالنسبة لجملة الاحداثيات . فهل يسوغ لنا هذا السبب ان نقول ان معادلات مكسويل الحقلية في علم التحريك الكهربائي قد نبذت علم الكهرباء الراكدة ؟ كلا وبتاتا . فعلم الكهرباء الراكدة ينضوي في علم التحريك الكهربائي كحالة حدية ، فقوانين هذا تعود الى قوانين ذاك عندما تصبح الحقول غير متغيرة بمرور الزمن . وما من مصير يمكن ان تؤول اليه نظرية فيزيائية احسن من مصير تبرز فيه كتمهيد لنظرية اوسع ادراكا وكحالة حدية لنظرية اعظم شمولا .

وفي المثال الذي عالجناه بخصوص انتشار الضوء ، رأينا ان نظرية النسبية العامة تتيح لنا ان نشتق نظريا تأثير الحقل التثاقلي على سير الحوادث الطبيعية التي عرفنا قوانينها في حالة غياب الحقل التثاقلي . لكن اجمل ما في نظرية النسبية العامة هو أنها قدمت مفتاح الحل في مجال التحري عن القوانين التي تحكم حقل التثاقل نفسه . فلنلق الآن نظرة اولية على ذلك .

لقد تعرفنا على المجالات المكانية ـ الزمانية التي تتصرف (تقريبا) تصرفا « غاليليا » لدى اختيار جيد لجسم المقارنة ، اي في المجالات الخالية من الحقل التثاقلي فاذا نسبنا الآن هذا المجال الى جسم مقارنة (K′) يتمتع بحركة غير منتظمة ، فاننا سنجد بالنسبة لـ (K′) حقلا تثاقليا متغيرا في المكان وفي الزمان(١) . ان صفات هذا الحقل ستتعلق طبعا بحركة (K′) . فقانون التثاقل العام يجب ، وفقا لنظرية النسبية العامة ، ان يكون صحيحا في اي حقل

(١) ان هذا ينتج من تعميم المناقشة الواردة في الفصل ٢ .

تثاقلي نحصل عليه بهذه الطريقة . هذا ورغم اننا لا نستطيع ان نولد بهذه الطريقة كل انواع الحقول التثاقلية الااننا لايمكن ان نحتفظ بالامل في ان نستنبط قانون التثاقل العام من حقول تثاقلية من نوع خاص . وهذا الامل قد تحقق بأحلى صوره . لكن بين الرؤية الواضحة للهدف وبين بلوغه كان لا بد من تذليل عقبة كأداة ، وبما ان هذا الامر متوغل الى اعماق الاشياء ، فلن اجرؤ على حجبه عن القارىء . وهذا يستلزم ان نوسع نظرتنا الى المتصل المكاني ـ الزمانـي الى ابعد مما وصلنا اليه حتى الآن .



٢٣ـ سلوك الميقاتيات وقضبان القياس المربوطة بجسم مقارنة دوار

لقد احجمت عمدا حتى الآن عن الحديث عن التفسير المكاني ـ الزماني للمعطيات في حالة نظرية النسبية العامة . وعلى هذا فانا مذنب ببعض الاهمال في معالجة امر يتكشف ، كما نعلم من نظرية النسبية الخاصة ، عن درجة عالية من الاهمية ، وهو ذنب لا يغتفر . وتدارك هذا النقص اصبح الآن شيئا ملحا . لكنني اود ان انبه منذ الآن أن هذا الموضوع يتطلب من القارىء صبرا غير قليل وقدرة كبيرة على التجريد .

ننطلق مرة اخرى من حالة خاصة جدا كنا قد استخدمناها مرارا . لنتأمل في مجال مكاني ـ زماني لا يوجد فيه حقل تثاقلي بالنسبة لجسم مقارنة (K) احسن اختيار حالته الحركية . ف K هو عندئذ جسم مقارنة غاليلي بخصوص المجال المعتبر ، وتصح فيه بالتالي النتائج المستخلصة من نظرية النسبية الخاصة . لنفترض ايضا اننا ننسب هذا المجال الى جسم مقارنة ثان (K') دوار بانتظام بالنسبة لـ (K) . ولتركيز الانتباه نتخيل ان (K') له شكل قرص مستدير مستو يدور بانتظام في مستويه الخاص وحول مركزه . فالراصد الموجود قرب حافة القرص (K') تتسلط عليه قوة تسعى الى قذفه خارج القرص في منحى قطري ، وتتفسر على انها مفعول عطالي (قوة نابذة) في رأي راصد ساكن بالنسبة لجسم المقارنة الاول (K) ، لكن الراصد الموجود على القرص يستطيع ان يعتبر قرصه جسم مقارنة « ساكن » ، وله في مبدأ النسبية العام ما يسوغ ذلك . فالقوة المتسلطة عليه ، وفي الواقع على اي جسم ساكن بالنسبة للقرص ، يشعر بها وكأنها فعل

حقل تثاقلي . بيد ان التوزع المكاني لهذا الحقل ليس من نوع الحقل الممكن وجوده في نظرية نيوتن في التثاقل(١) . ولكن بما ان الراصد يعتقد بنظرية النسبية العامة فان ذلك لا يقلقه ، وهو على حق عندما يعتقد بامكانية صوغ قانون للتثاقل — قانون لايتيح تفسيرحركة النجوم بدقة فحسب بل ويفسرايضا حقل القوة الذي يعانيه .

هذا ويبدأ الراصد بتنويع تجاربه فوق قرصه المستدير على الميقاتيات وقضبان القياس . وهو يهدف من وراء ذلك الى التوصل لتعاريف مضبوطة لمعنى المعطيات المكانية — الزمانية بالنسبة للقرص الدوار (K′) ، لتعاريف تستند على نتائج ارصاده الخاصة . فماذا سيجد في مهمته هذه ؟

يبدأ بوضع احدى الميقاتيتين المتماثلتي التركيب في مركز القرص وبحيث تكونان ساكنتين بالنسبة له . والآن نتساءل عما اذا كان سير الميقاتيتين واحدا بالنسبة لانسان موجود في جسم المقارنة الغاليلي غير الدوار (K) . ان الميقاتية الموجودة في مركز القرص تبدو ساكنة من (K) ، بينما تبدو الميقاتية الموجودة عند حافة القرص متحركة من (K) بسبب الدوران . وبموجب ما سبق ذكره في الفصل ١٢ — ينتج ان ميقاتية الحافة تقصر باستمرار عن ميقاتية المركز ، عندما ينظر اليهما من (K) . ومن الواضح ان المفعول نفسه هذا يراه انسان موجود مع ميقاتيته في مركز القرص . فعلى قرصنا الدوار اذن ، او في اي حقل تثاقلي عموما ، تبدو الميقاتية مقصرة او مسبقة بحسب المكان الذي وضعت فيه (ساكنة) ، ولهذا السبب لا يمكن ان نحصل للزمن على تعريف معقول بواسطة ميقاتات تتدبر امر سكونها بالنسبة لجسم المقارنة . وثمة صعوبة مشابهة تبرز عندما نحاول تطبيق تعريف التزامن في مثل هذه الحالة ، لكنني لا اريد الذهاب الى أبعد من ذلك في هذه المسألة .

هذا ونصادف صعوبات هنا لا يمكن تخطيها ، بخصوص ايجاد تعاريف للاحداثيات المكانية . فاذا وضع الراصد قضيب قياسه العياري (الذي

(١) — ان هذا الحقل ينعدم في مركز القرص وتتزايد شدته كلما زاد البعد عن المركز متناسبة مع هذا البعد .

نفترضه اقصر بكثير من نصف قطر القرص) على حافة القرص ، فان القضيب يبدو ، من الجملة الغاليلية ، ذا طول اصغر من ١ ، لانه يعاني ، بموجب ما جاء في الفصل ١٢ ، تقاصرا في منحى الحركة . بينما لا يعاني قضيب القياس، كما يبدو من (K) ، اي تقاصر عندما يوضع على طول نصف القطر .
وعلى هذا ، اذا قاس الراصد اولا محيط القرص بقضيب قياسه ثم قاس قطره ، وقسم اولهما على الثاني فلن يجد العدد المعروف ... 3,14 = π ، بل سيجد عددا اكبر منه(١) ، لكنه كان سيجد هذا العدد π بالضبط لو كان القرص ساكنا في K . وهذا يثبت ان مقولات الهندسة الاقليدية لا تصح تماما على القرص الدوار ، ولا في اي حقل تثاقلي عموما ، وذلك ، على الاقل ، اذا استمررنا في اعطاء القيمة ١ الى طول القضيب مهما كان مكانه وفي اي اتجاه كان . وهكذا فان فكرة الخط المستقيم تفقد ايضا معناها . وبذلك لا نعود قادرين على اعطاء تعريف متماسك للاحداثيات (x , y , z) بالنسبة للقرص وبالطريقة التي ناقشناها في النظرية الخاصة ، ومادمنا لا نستطيع اعطاء تعريف لمكان الحوادث وزمانها ، فلن نستطيع ايجاد معنى دقيق للقوانين الطبيعية التي تتناول هذه الحوادث .

وهكذا فان كل استنتاجاتنا المبنية على النسبية العامة تنطرح على بساط البحث . وعلينا ، في الحقيقة ، ان نسلك منعطفا حرجا كي نستطيع تطبيق مسلّمة النسبية العامة دون اي خطأ . وسأمهد الطريق للقارىء في الصفحات المقبلة .

---

(١) — ان هذه المحاكمة منسوبة الى الجملة الغاليلية K (اللادوارة) كجسم مقارنة ، لان نتائج نظرية النسبية الخاصة لا تصح الا في مثل هذه الجمل (فبالنسبة لـ K' يوجد حقل تثاقلي) . (المؤلف) .

يمكن ايضا ان ننسب هذه المحاكمة الى راصد موجود في مركز القرص ، لانه ساكن بالنسبة لـ K (المترجم) .

٢٤ ـ المتصل الإقليدي والمتصل اللاإقليدي

ان سطح المنضدة الرخامي منبسط امامي . واستطيع ان اذهب من نقطة منه الى اية نقطة اخرى وذلك بأن امر باستمرار من نقطة اخرى « تجاورها » وهكذا دواليك عددا (كبيرا) من المرات ، او ، بتعبير آخر ، بالسير نقطة فنقطة دون ان اقوم بأية « قفزة » . انني على يقين من ان القارىء سيدرك بوضوح كاف ما اعني بكلمتي « تجاور » و « قفزة » (اذا لم يكن متحذلقا كثيرا). ونعبر عن خاصة السطح هذه بقولنا انه يشكل متصلا .

لنتصور الآن اننا صنعنا عددا كبيرا من القضبان الصغيرة بطول واحد وان طول كل منها صغير بالنسبة لابعاد لوح الرخام . وعندما اقول انهامتساوية الطول اقصد انه يمكن وضع واحد فوق الآخر دون ان يزيد عليه او ينقص عنه شيئا . ثم نصف اربعة من هذه القضبان بحيث تشكل مضلعا رباعيا (مربعا) متساوي القطرين . ولكي نتأكد من تساوي القطرين نستعمل قضيبا عياريا صغيرا . والى هذا المربع نضيف مربعات اخرى تماثله ، وبحيث لا يشترك اي مربع مع مربع آخر الا بقضيب واحد . ونستمر بهذا العمل حتى نغطي لوح الرخام كله بالمربعات . فكل ضلع مربع في هذا الترتيب ينتمي الى مربعين فقط وكل ذروة تنتمي الى اربعة مربعات .

اننا سنحقق اعجوبة لو استطعنا اتمام هذه المهمة دون ان نقع في مصاعب عظيمة . لنفكر فقط فيما يلي ، اذا حدث والتقى ثلاثة مربعات في ذروة فان ضلعين من المربع الرابع يصبحان جاهزين ، وكنتيجة لذلك يصبح عندئذ موضعا الضلعين الباقيين منه معينين تماما . لكنني لن أستطيع بعدئذ ان اتدبر الامر بحيث يتساوى قطر هذا المربع الاخير . فاذا تساويا من تلقاء نفسيهما فان ذلك يكون محاباة مواتية يقدمها لنا لوح الرخام والقضبان الصغيرة ،

وسأكون لها مندهشا بامتنان . ولا بد ان نواجه مفاجآت كثيرة من هذا النوع قبل ان ننجح في هذا العمل .

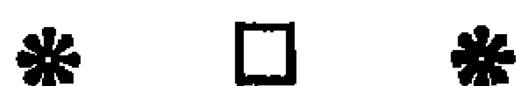
فاذا سار كل شيء على ما يرام أقول ان نقاط لوح الرخام تشكل متصلا اقليديا بالنسبة للقضيب الصغير الذي استعملناه كـ « مسافة » (مجال خطي) . واذا اخترت احدى الذرى كنقطة « اصل » أستطيع ان احدد مكان أية ذروة أخرى ، بالنسبة للاصل ، بعددين . وفي سبيل ذلك لا احتاج الا ان اعرف عدد القضبان التي يجب ان أمر عليها ، انطلاقا من الاصل نحو « اليمين » ثم نحو « الاعلى » حتى أصل الى ذروة المربع المستهدفة . وهذان العددان هما عندئذ « الاحداثيان الديكارتيان » لهذه الذروة في « جملة الاحداثيات الديكارتية » المعنية بترتيب القضبان الصغيرة .

فاذا ادخلنا التعديل الاتي على هذه التجربة التجريدية فلا بد ان نلاحظ وجود حالات لا يمكن ان تنجح فيها هذه التجربة . سنفترض ان القضبان « تتمدد » بمقادير متناسبة مع ازدياد درجة الحرارة . اي نسخن الجزء المركزي من لوح الرخام ، ولا نسخن محيطه ، ففي هذه الحالة يبقى اثنان من القضبان الصغيرة منطبقين في كل موضع من اللوح . لكن المربعات التي انشأناها لا بد ان تصيبها الفوضى اثناء التسخين لان القضبان الموجودة في المنطقة المركزية تتمدد بينما لا تتمدد القضبان القريبة من المحيط .

فبالنسبة لقضباننا الصغيرة ـ التي اتخذناها واحدة للطول ـ لا يعود لوح الرخام متصلا اقليديا ، ولا نعود قادرين على تعريف احداثيات ديكارتية مباشرة بواسطة القضبان ، لان الانشاء السابق لا يعود قائما كما كان . ولكن بما انه لا تزال توجد اشياء لم تتأثر كما تأثرت القضبان (او لم تتأثر بالمرة) بتسخين اللوح ، فمن الممكن بالطبع ان نحتفظ بوجهة نظرنا بأن اللوح « متصل اقليدي » . وهذا يمكن ان يتم بصورة مرضية باصدار اعتبارات اكثر حذقا بخصوص عملية القياس او مقارنة الاطوال .

لكن ، اذا كانت القضبان من كل جنس (اي من اية مادة) ستتصرف **بأسلوب واحد** بتأثير درجة الحرارة في شتى مناطق لوح الرخام ، واذا لم

تكن نملك اية وسيلة لكشف تأثير درجة الحرارة غير السلوك الهندسي لقضباننا في تجارب تشبه تلك التي شرحناها آنفا ، فان احسن حل هو ان نعطي للمسافة بين نقطتين من اللوح القيمة **واحد** ، شرط ان ينطبق طرفا القضيب على هاتين النقطتين ، والا فكيف يجب ان نعرف المسافة دون الاستعانة بطريقتنا هذه ودون ان يكون الاسلوب اعتباطيا جدا ؟ فطريقة الاحداثيات الديكارتية ستفقد عندئذ اعتبارها وستحل محلها طريقة اخرى تنبذ صحة الهندسة الاقليدية من اجل اجسام صلبة(١) . وسيلاحظ القارىء ان الوضع هنا يقابل الوضع الذي كشفته فرضية النسبية العامة (فصل ٢٣) .

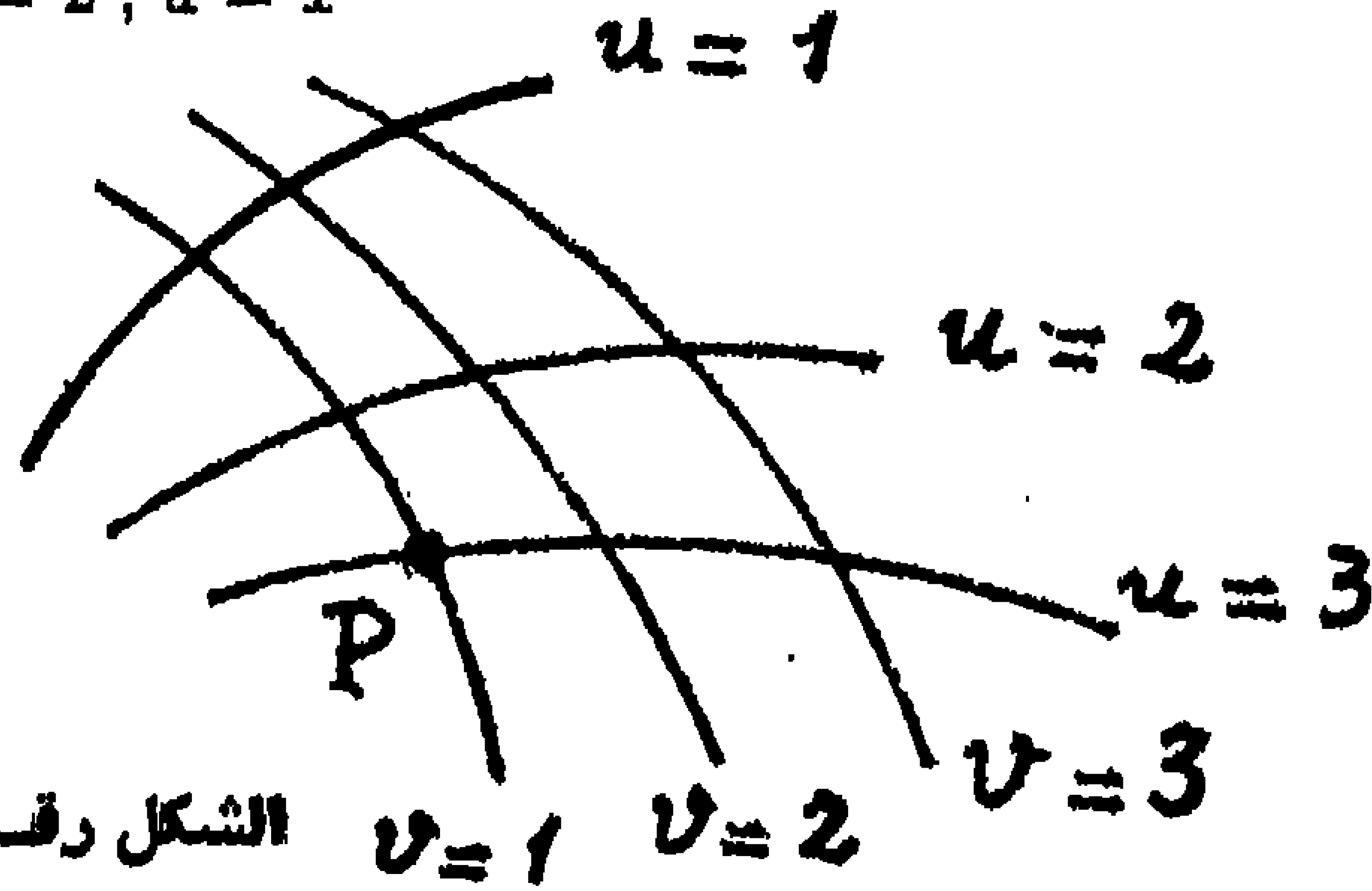


(١) ــ لقد عالج الرياضيون مسألتنا هذه كما يلي : اذا اعطينا سطحا (كمجسم اهليلجي مثلا) في الفضاء الاقليدي الثلاثي الابعاد فسنجد من اجل هذا السطح هندسة ذات بعدين ، كهندسة المستوي تماما . وقد اخذ (غوص) على عاتقه معالجة الهندسة ذات البعدين هذه من مبادىء اولى ، دون ان يعتمد على واقع أن هذا السطح ينتمي الى متصل اقليدي ذي ثلاثة أبعاد . فاذا تصورنا انشاء مصنوعا من قضبان صلبة **على السطح** (كما على لوح الرخام) فسنجد ان القوانين التي تسود عليه تختلف عن القوانين السائدة في الهندسة الاقليدية المستوية . فليس السطح متصلا اقليديا بالنسبة للقضبان ولا نستطيع تعريف احداثيات ديكارتية **على السطح** . وقد دل غوص على المبادىء التي يمكن ان نعالج بها العلاقات على هذا السطح ، واوضح بذلك طريقة ريمان في معالجة المتصلات اللا اقليدية العديدة الابعاد . وبذلك حل الرياضيون هذه المسائل الشكلية التي نصادفها في نظرية النسبية العامة .

٢٥ ـ الإحداثيات الغوصية

ان الجمع بين التحليل والهندسة في معالجة هذه المسألة تتم ، بموجب اعمال غوص GAUSS ، وفق الطريقة التالية . نتصور مجموعة منحنيات اختيارية (شكل ٤) مرسومة على سطح المنضدة ، نرمز لها بالمنحنيات (U) وندل على كل منها بعدد . وقد رسمنا في الشكل المنحنيات

u =3 , u = 2 , u = 1



الشكل رقم ـ ٤ ـ

وبين المنحنيين U = 1 , U = 2 ، مثلا ، نتصور عددا لامتناهيا من المنحنيات التي يجب ان ترسم ، وكلها تتعلق باعداد حقيقية محصورة بين 1 , 2 . وبذلك يكون لدينا مجموعة من المنحنيات u ذات « كثافة لامتناهية » تغطي سطح المنضدة كله . ان ايا من هذه الخطوط لا يقطع أيا آخر ولا يمر بكل نقطة من سطح المنضدة سوى خط واحد . وبذلك نعلق بكل نقطة من سطح لوح الرخام قيمة لـ u معينة تماما . وبشكل مشابه نتصور مجموعة منحنيات V مرسومة على المنضدة وتتمتع بالخواص التي تتمتع بها منحنيات u ، فهي ذات اشكال اختيارية ونعلق بها اعدادا كما سلف ... ينتج من ذلك انه قد تعلق بكل نقطة من سطح المنضدة قيمة عددية لـ u وقيمة عددية لـ V . نسمي هذين العددين احداثيي النقطة (احداثيين غوصيين) على المنضدة . فالنقطة (P) مثلا ، على الشكل ٤ ، لها الاحداثيان

الغوصيان $u = 3$ ، $V = 1$ والنقطتان المتجاورتان (P و P') تتعلقـــان بالاحداثيين :

$$P : u, v$$
$$P' : u + du, v + dv$$

حيث du , dv يعنيان عددين صغيرين جدا . وبطريقة مشابهـــة يمكن ان ندل على المسافة (المجال الخطي) بين P و P' ، كما نقيسها بقضيب صغير ، بالعدد الصغير جدا ds . وبموجب غوص نجد

$$ds^2 = g_{11} du^2 + 2g_{12} du dv + g_{22} dv^2$$

حيث g_{22} ، g_{12} ، g_{11} مقادير تتعلق بشكل معين تماما بـ u , v . وهي تحدد سلوك القضبان بالنسبة لمنحنيات u ولمنحنيات v ، وبالتالي بالنسبة لسطح المنضدة . فعندما تكون نقاط السطح المعتبر مؤلفـــة متصلا اقليديا بالنسبة لقضبان القياس ، وفي هذه الحالة فقط ، يمكن ان نرسم المنحنيات u والمنحنيات v وان نعلق بها اعدادا بحيث نحصـــل بكل بساطة على :

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

وضمن هذه الشروط فقط تكون المنحنيات خطوطا مستقيمة بالمعنـــى الاقليدي ومتعامدة . فهنا تنقلب الاحداثيات الغوصية الى احداثيات ديكارتية يتضح اذن ان الاحداثيات الغوصية ليست اكثر من تعليق مجموعتين مـــن الاعداد بنقاط السطح المعتبر بحيث تتعلق نقطتان متجاورتان « من المكـــان » بثنائيتين عدديتين لا تختلفان فيما بينهما الا بعددين صغيرين جدا .

ان هذه المحاكمات تصح في متصل ذي بعدين . لكن طريقة غوص يمكن ان تطبق ايضا على متصل ذي ثلاثة ابعاد او اكثر . فاذا كنا مثلا ازاء متصل ذي اربعة ابعاد نستطيع ان نمثله بالطريقة التالية :

نعلق بشكل اختياري بكل نقطة من المتصل اربعة اعداد x_1 ، x_2 ، x_3 ، x_4 ، معروفة باسم « احداثيات » . فالنقاط المتجاورة تتعلق بقيم متجاورة من الاحداثيات . فاذا علقنا بالنقطتين المتجاورتين مسافة ds معينة وقابلة للقياس تماما ومن وجهة نظر فيزيائية ، فاننا نستنتج صيغة من الشكل :

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 \; . \; . \; . \; . \; + g_{44}dx_4^2.$$

حيث المقادير g_{11} و . . . الخ ذات قيم تتغير بتغير مكان النقطة في المتصل . وعندما يكون المتصل اقليديا حصرا يمكن ان نعلق احداثيات ، x_1 و x_4 ، بنقاط المتصل يكون معها :

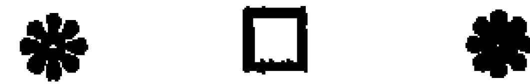
$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2.$$

ففي هذه الحالة نجد في المتصل الرباعي الابعاد علاقات تشبه تلك التي نجدها في القياسات الثلاثية الابعاد .

على ان طريقة غوص هذه في معالجة ds^2 ، التي شرحناها اعلاه ، ليست دوما ممكنة . فهي غير ممكنة الا اذا استطعنا اعتبار كل منطقة صغيرة من المتصل المدروس متصلا اقليديا . وهذا مثلا واضح في حالة لوح رخام المنضدة وتغير السخونة الموضعي . فدرجة الحرارة ثابتة عمليا من اجل جزء صغير من اللوح ، وبذلك يكون التصرف الهندسي للقضبان **تقريبا** كما يجب ان يكون طبقا لقواعد الهندسة الاقليدية . وعلى هذا فان الاختلالات في انشاء المربعات ، في الفصل السابق ، لا تظهر بوضوح حتى يمتد هذا الانشاء على منطقة واسعة من سطح المنضدة .

يمكن ان نجمع هذه النتائج كما يلي : لقد اخترع غوص لمعالجة المتصلات بصورة عامة طريقة رياضية تتعين فيها « علاقات الاتساع » (المسافات بين النقاط المتجاورة) . فبكل نقطة من المتصل تتعلق مجموعة من الاعداد (احداثيات غوصية) بعدد الابعاد التي يتميز بها المتصل . وتتم هذه العملية بحيث لا يكون لهذا التعليق الا معنى واحد وبحيث لا تختلف هذا الاعداد

(الاحداثيات الفوصية) فيما بينها الا بمقادير صغيرة جدا عندما نمر الى نقطة مجاورة . فجملة الاحداثيات الفوصية هي تعميم منطقي لجملة الاحداثيات الديكارتية . وهي لا تنطبق على المتصلات اللا اقليدية ، بخصوص « الاتساع » او « المسافة » الا اذا امكن اعتبار الاجزاء الصغيرة منها وكأنها متصلات اقليدية .



٢٦ ـ المتصل المكاني ـ الزماني في نظرية النسبية الخاصة على اعتبار انه متصل اقليدي

لقد اصبحنا الآن قادرين على ان نصوغ بدقة اكبر فكرة منكوفسكي التي المحنا اليها في الفصل ١٧ . فبموجب نظرية النسبية الخاصة تعطى بعض جمل الاحداثيات افضلية في توصيف المتصل المكاني ـ الزماني ذي الابعاد الاربعة . وقد سميناها « جمل الاحداثيات الغاليلية » . فالاحداثيات الاربعة ، x و y و z و t، التي تعين الحادث او ـ بتعبير آخر ـ تعين نقطة من المتصل الرباعي الابعاد ، تتعرف فيزيائيا بطريقة بسيطة ، كما شرحنا في القسم الاول من هذا الكتاب . والمرور من جملة غاليلية لاخرى تتحرك بالنسبة لها حركة منتظمة يتم على اساس صحة معادلات تحويل لورنتس . وهذه المعادلات تشكل اساسا لاستنباط النتائج من نظرية النسبية الخاصة ، وهي بحد ذاتها ليست اكثر من صيغة لسيادة قانون انتشار الضوء في كل جمل المقارنة الغاليلية .

لقد وجد منكوفسكي ان تحويلات لورنتس تستجيب للشروط البسيطة التالية : لنعتبر حادثين متجاورين المسافة بينهما في المتصل الرباعي الابعاد هي ، بالنسبة لجملة المقارنة الغاليلية (K) ، الفروق الاحداثية dx و dy و dz للمكان و dt للزمان . ولتكن هذه الفروق هي dx', dy', dz', dt' وهي المسافة المكانية ـ الزمانية بينهما بالنسبة لجملة مقارنة غاليلية اخرى K' . ان هذه القيم تحقق دوما الشرط (١) :

(١) ـ انظر الملحقين ١ و ٢ . ان العلاقات التي نشتقها هناك من اجل الاحداثيات نفسها صحيحة ايضا من اجل الفروق الاحداثية ، وكذلك من اجل التفاضلات الاحداثية (اللامتناهية في الصغر) .

$$dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2=dx'^2+dy'^2+dz'^2-c^2dt'^2.$$

ان صلاحية تحويل لورنتس تنتج من هذا الشرط . ويمكن ان نعبر عنه كما يلي : ان المقدار $ds^2=dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2,$

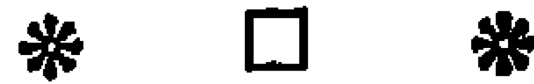
الذي يخص الحادثين المتجاورين في المتصل المكاني ـــ الزماني الرباعي الابعاد ، له قيمة واحدة في أي جسم مقارنة (غاليلي) نختاره . فاذا بدلنـــا x و y و z $\sqrt{-1}\,ct,$ بـ $x_1, x_2, x_3, x_4.$

نجــد ان المقــدار :

$$ds^2=dx_1^2+dx_2^2+dx_3^2+dx_4^2$$

ذو قيمة مستقلة عن اختيار جسم المقارنة . نسمي المقدار ds « المسـافة » بين الحادثين او بين نقطتين في المتصـل الرباعي الابعاد .

وهكذا ، اذا اخترنا ، كمتحول زمني ، المتحول التخيلي $\sqrt{-1}\,ct$ بدلا من المتحول الحقيقي t ، يمكن ان ننظر الى المتصل المكاني ـــ الزماني ـــ طبقا لنظرية النسبية الخاصة ـــ وكأنه متصـل « اقليدي » رباعي الابعاد ، وهي نتيجة تنبع من الاعتبارات الواردة في الفصل السـابق .



٢٧ ـ المتصل المكاني ـ الزماني لنظرية النسبية العامة ليس متصلا اقليديـا

لقد استطعنا في القسم الاول من هذا الكتاب ان نستعمل الاحداثيات المكانية ـ الزمانية التي تتيح تفسيرا فيزيائيا بسيطا ومباشرا والتي يمكن ان تتخذ ، كما جاء في الفصل ٢٦ ، احداثيات ديكارتية رباعية الابعاد . وقد كان ذلك ممكنا بالاعتماد على قانون ثبات سرعة الضوء . لكننا راينا في الفصل ٢١ ان ان نظرية النسبية العامة لا تعترف بهذا القانون . بل اننا ، على العكس، توصلنا في هذه النظرية الى ان سرعة الضوء لا بد ان تتعلق بالاحداثيات عندما يوجد حقل تثاقلي . ووفقا لما اوضحناه في الفصل ٢٣ نرى ان وجود الحقل التثاقلي يخل بتعريف الاحداثيات والزمن ، ذلك التعريف الذي توصلنا اليه نظرية النسبية الخاصة .

وبامعان النظرفي نتاج هذه المحاكمات نجد انفسنا مسوقين الى الاقتناع ،بموجب مبدأ النسبية العام ، بأن المتصل المكاني ـ الزماني لا يمكن ان يعتبر متصلا اقليديا ، ولكننا نحصل هنا على الحالة العامة التي تتعلق بلوح الرخام مع تغيرات درجة الحرارة الموضعية والتي تعرفنا بواسطتها على نموذج من المتصل ذي البعدين . وكما استحال علينا هناك انشاء جملة احداثيات ديكارتية من قضبان متساوية ، يستحيل علينا هنا ان نبني جملة (جسم مقارنة) من اجسام صلبة وميقاتيات ذات طبيعة من شأنها ، اذا رصفت بشكل متماسك فيما بينها ، ان تتيح تعيين الموضع والزمن مباشرة . تلك كانت روح الصعوبة التي واجهناها في الفصل ٢٣ .

لكن محاكمات الفصلين ٢٥ و ٢٦ تدلنا على طريقة للتغلب على هذه الصعوبة . ننسب المتصل المكاني ـ الزماني الرباعي الابعاد بوسيلة اختيارية

الى احداثيات غوصية . ونعلق بكل نقطة من المتصل (الحادث) اربعة اعداد x_1, x_2, x_3, x_4 (احداثيات) ليس لها اقل معنى فيزيائي مباشر ولكنها تفيد فقط في ترقيم نقاط المتصل بطريقة مختارة معينة . حتى ان هذا التدبير لا يستلزم ان يكون من نوع يجعلنا نتخذ x_1, x_2, x_3 احداثيات « مكان » و x_4 احداثي « زمان » .

قد يظن القارىء ان تدبير العالم بهذه الطريقة لن يكون ملائما تماما . فماذا يعني ان نعلق بالحادث الاحداثيات المختارة x_1, x_2, x_3, x_4 اذا كانت هذه الاحداثيات نفسها عديمة المعنى ؟ ان تفحص هذا الامر بعناية اكبر يدل على ان هذا القلق لا اساس له . لنعتبر مثلا نقطة مادية ذات حركة من اي نوع. فاذا لم يكن لهذه النقطة سوى وجود مؤقت دون فترة زمنية ، فسنتمكن من توصيفها في المكان ــ الزمان بمجموعة وحيدة من القيم x_1, x_2, x_3, x_4 . وبذلك يجب ان يتعين وجودها المستمر بعدد لا متناه من امثال مجموعات القيم هذه ، احداثياتها متقاربة لدرجة ان تؤلف استمرارا ؛ وبذلك نحصل على خط (وحيد البعد) في المتصل الرباعي البعد متعلق بالنقطة المادية . وبالطريقة ذاتها تصبح مثل هذه الخطوط في متصلنا متعلقة بعدة نقاط متحركة. والمقولات الوحيدة بخصوص هذه النقاط والتي يمكن ان تتطلب وجودا فيزيائيا هي في الواقع ما نقوله عن لقائها . ومثل هذا اللقاء ، في معالجتنا الرياضية ، يتجلى في واقع ان الخطين اللذين يمثلان حركتي النقطتين المدروستين لهما مجموعة معينة من قيم احداثيات x_1, x_2, x_3, x_4 ، مشتركة . وبعد تفكير عميق سيقبل القارىء دون شك ان مثل هذه اللقاءات تشكل في الواقع الشيء البارز فعلا ذا الطبيعة المكانية ــ الزمانية التي نصادفها في المقولات الفيزيائيـة .

عندما كنا نصف حركة نقطة مادية بالنسبة لجسم مقارنة لم نكن نتكلم عن اكثر من لقاءات هذه النقطة بنقاط خاصة من جسم المقارنة . ويمكن ايضا ان نعين قيم الزمن المستهدفة برصد لقاءات الجسم مع الميقاتيات ، بواسطة رصد لقاء عقارب الميقاتية بنقاط خاصة من المينا . والامر كذلك

بالضبط في حالة عمليات القياس المكانية بواسطة قضبان قيـاس ، وذلـك ما نستنتجه من محاكمة قصيرة .

ان الفكرة التالية صحيحة عموما : ان كل توصيف فيزيائي يتحلل الـى عدد من المقولات يتناول كل منها انطباقا مكانيا – زمانيا لحادثين A, B . وكل مقولة من هذا النوع تصاغ ، بلغة الاحداثيات الغوصية ، بانطباق مجموعتي احداثياتهما الاربع x_1, x_2, x_3, x_4 . وهكذا نجد ، في الواقع ، ان التوصيف المكاني ــ الزماني للمتصل بواسطة الاحداثيات الغوصية يحل محل التوصيف بواسطة جسم المقارنة ، دون ضرر ينجم عن عيوب طريقة التوصيف السابقة ، وهو بذلك لا يرتبط بالخاصية الاقليديـة للمتصـل التي يجب تمثيلهـا .

❋ □ ❋

٢٨ ـ الصياغة السديدة لمبدأ النسبية العام

نحن الآن في وضع يتيح لنا ان نستبدل بالصيغة المؤقتة لمبدا النسبية العام التي اعطيت في الفصل ١٨ صيغة سديدة . فالنص المستعمل هناك : « ان كل اجسام المقارنة K ، K' ، الخ ، متكافئة في توصيف الظواهر الطبيعية (صياغة قوانين الطبيعة العامة) مهما كانت حالتها الحركية » لا يمكن الاحتفاظ به ، لان استخدام اجسام مقارنة صلبة ، بالمعنى السائد في نظرية النسبية الخاصة ، ليس في الحالة العامة ممكنا في التوصيف المكاني – الزماني، بل ان جملة احداثيات غوص يجب ان تحل محل جسم المقارنة . فالنص التالي ينسجم مع الفكرة الاساسية لمبدا النسبية العام : **« ان كل جمل الاحداثيات الغوصية متكافئة جوهريا في صياغة القوانين العامة للطبيعة »** .

ويمكن ان تنص على مبدأ النسبية العام هذا بشكل آخر ايضا يجعله اقرب الى الفهم مما كان عليه عندما كان امتدادا لمبدا النسبية الخاص . فالمعادلات التي تعبر ، في المبدأ الخاص ، عن قوانين الطبيعة العامة تبقى على شكلها نفسه لدى استعمال تحويل لورنتس في ابدال المتحولات المكانية ـ الزمانية ، x, y, z, t لجسم مقارنة K (غاليلي) بالمتحولات المكانية ـ الزمانية x', y', z', t' لجسم مقارنة آخر K' (غاليلي). ومن جهة اخرى وطبقا لنظرية النسبية العامة ، فان تطبيق **ابدالات اختيارية** على متحولات غوص x_1, x_2, x_3, x_4 يجعل المعادلات تتحول الى معادلات من الشكل نفسه ، لان كل تحويل (لا تحويل لورنتس فحسب) يعبر عن انتقال من جملة احداثيات غوصية الى اخرى .

واذا رغبنا في الالتزام بوجهة نظرتنا « العتيقة » الى الامور ، نستطيع ان نصف التطور الذي تتضمنه الفكرة الاساسية لنظرية النسبية العامة كما

يلي : ان نظرية النسبية الخاصة تعتمد على المجالات الفاليلية ، اي تلك التي لا يوجد فيها حقل تثاقلي . فهذه النظرية تعتمد على اجسام مقارنة غاليليه ، اي على جسم صلب نختار حالته الحركية بحيث يكون قانون غاليله في الحركة المنتظمة للنقاط المادية « المعزولة » صحيحا بالنسبة له .

هذا وتوحي بعض الاعتبارات بوجوب نسب المجالات الفاليلية نفسها الى اجسام مقارنة **لا غاليلية** ايضا . وسيوجد عندئذ حقل تثاقلي ، من نوع خاص ، بالنسبة لهذه الاجسام (انظر الفصل ٢٠ والفصل ٢٣) .

ففي حقول التثاقل لا يوجد اشياء تتخذ اجسام مقارنة ذات خواص اقليدية ، وعلى هذا فان جسم المقارنة الصلب الموهوم عديم الفائدة في نظرية النسبية العامة . فعمل الميقاتيات يتأثر ايضا بالحقول التثاقلية ، وبشكل يجعل اي تعريف فيزيائي للزمن ، مستند مباشرة على استخدام الميقاتيات ، تعريفا لا يتمتع بنفس الدرجة من الثقة التي يتمتع بها في نظرية النسبية الخاصة .

ولهذا السبب لا تستخدم اجسام مقارنة صلبة ، فهي بمجملها ليست متحركة كيفما اتفق فحسب ، بل وتعاني ايضا تغيرات في الشكل تلقائية اثناء حركتها . والميقاتيات ، التي يكون قانون الحركة من اجلها كيفما اتفق ، مهما كان فوضويا ، تفيد في تعريف الزمن : علينا ان نتصور كل واحدة من هذه الميقاتيات مثبتة في نقطة من جسم المقارنة اللاصلب . وليس على هذه الميقاتيات سوى ان تحقق شرطا واحدا ينص على ان تكون « مقروءاتها » المرصودة في آن واحد على ميقاتيات متلاصقة (في المكان) متفاوتة فيما بينها بفروق لامتناهية في الصفر . وان جسم المقارنة اللاصلب هذا ، الذي يمكن ان نسميه « رخوي المقارنة » يكافيء رئيسيا جملة احداثيات غوصية رباعية الابعاد مختارة كيفما اتفق . وان ما يمنح هذا « الرخوي » بعض التبرير عندما نقارنه بجملة الاحداثيات الغوصية هو الاحتفاظ (الغير مسوغ حقا) الشكلي بالوجود المنفصل للاحداثيات المكانية في مواجهة الاحداثي الزمني . فكل نقطة من الرخوي تعامل كنقطة ــ مكان ، وكل نقطة مادية تعتبر ساكنة بالنسبة اليه كجسم ساكن ، طالما بقينا نتخذ الرخوي كجسم مقارنة . ويقتضي مبدأ النسبية

العام امكانية استخدام كل هذه الرخويات كأجسام مقارنة ، بدون تمييز وبقدر واحد من النجاح ، لدى صياغة القوانين العامة للطبيعة ، اي ان القوانين نفسها يجب أن تكون مستقلة عن اختيار الرخوي .

هذا وان المقدرة العظيمة لمبدأ النسبية العام تكمن في المحدودية المعقولة التي يفرضها على قوانين الطبيعة بنتيجة ما رأيناه اعلاه .

* * *

٢٩ ـ حل مسألة التثاقل بالإستناد على مبدأ النسبية العام

اذا كان القارىء قد استوعب كل محاكماتنا السابقة فلن يجد صعوبة في فهم الطرائق التي تقود الى حل مسألة التثاقل .

ننطلق من التأمل في مجال غاليلي ، اي في مجال لا يحوي حقلا تثاقليا بالنسبة لجسم مقارنة غاليلي K فسلوك قضبان القياس والميقاتيات، بالنسبة لـ K ، معروف من نظرية النسبية الخاصة ، وكذلك سلوك النقاط المادية « المعزولة » ، فهي تتحرك حركة منتظمة في خطوط مستقيمة .

ننسب الآن هذا المجال الى جملة احداثيات غوصية فوضوية او الى رخوي نتخذه جسم مقارنة . فبالنسبة لـ K' يوجد حقل تثاقلي G (من نوع خاص) . فنحن نتعلم سلوك قضبان القياس والميقاتيات ، والنقاط المادية المتحركة بحرية ، بالنسبة لـ K' من التحويل الرياضي فقط . ونفسر هذا السلوك بأنه سلوك نقاط مادية متحركة وقضبان قياس وميقاتيات بفعل حقل تثاقلي G . وعلى هذا ندخل هنا فرضية : ان تأثير الحقل التثاقلي على قضبان القياس وعلى الميقاتيات وعلى النقاط المتحركة يستمر في فعله وفق قوانين واحدة : حتى ولو لم يكن الحقل التثاقلي الفاعل قابلا للاشتقاق من حالة غاليلية خاصة بواسطة تحويل احداثيات فقط .

والخطوة التالية تقضي بتحري السلوك المكاني ــ الزماني للحقل التثاقلي G ، وذلك كما يستنبط من الحالة الغاليلية الخاصة بواسطة تحويل احداثيات فقط . ان هذا السلوك يجب ان يصاغ بقانون صالح مهما كانت وسيلة اختيار جسم المقارنة (الرخوي) المستخدم في التوصيف .

ان هذا القانون لن يكون القانون **العـام** الذي يحكم الحقل التثاقلي ، لان الحقل التثاقلي الذي ندرسه حقل من نوع خاص . ولايجاد القانون العـام للتثاقل ، مانزال بحاجة للحصول على تعميم للقانون كما وجدناه اعلاه . وهذا ما يمكن ان نحصل عليه ، موضوعيا وفي كل الاحوال ، بأخذ المتطلبات التالية بعين الاعتبار :

آ ـ يجب على التعميم المطلوب ان يستجيب ايضا لمسلمة النسبية العامة.

ب ـ اذا وجدت اية مادة في المجال المدروس فان كتلتها العطالية فقط ، وبالتالي وبموجب ما جاء في الفصل ١٥ ، طاقتها فقط ذات اهمية في توليد حقل بتأثيرها .

ج ـ يجب على الحقل التثاقلي والمادة معا ان يطيعا قانون انخفاض الطاقة (وقانون انحفاظ الاندفاع (١)) .

وفي النهاية ، يتيح لنا مبدا النسبية العام معرفة تاثير الحقل التثاقلي على سير جميع العمليات التي تتم وفق قوانين معروفة في حالة غياب الحقل التثاقلي ، اي القوانين التي اوجدناهـا في جمل المقارنة في نظريـة النسبية الخاصة . وبهذا الصدد نلجأ مبدئيا الى تطبيق الطريقة التي شرحناها منـذ قليل بخصوص قضبان القياس والميقاتيات والنقاط المادية المتحركة بحرية .

ان نظرية التثاقل المستنبطة بهذا الاسلوب من مسلمة النسبية العامـة تسمو ، لا بجمالها فحسب ، ولا بنظافتها من العيب الذي يشوب الميكانيك التقليدي والذي فصلناه في الفصل ٢١ ؛ ولا بتفسيرها للقانون التجريبي في تساوي الكتلة العطالية الثقالية ، بل وايضا في تفسير نتائج ارصاد فلكية عجز الميكانيك التقليدي عن تفسيرها .

هذا واذا اقتصرنا لدى تطبيق النظرية ، على الحالة التي يمكن اعتبـار الحقل فيها ضعيفا والتي تكون فيها كل الكتل متحركة ، بالنسبـة لجملة

---

(١) الاندفاع هو حاصل ضرب كتلة الجسم بسرعته (المترجم) .

الاحداثيات ، بسرعات صغيرة ازاء سرعة الضوء ، نحصل عندئذ على نظرية نيوتن كتقريب اولي . وبذلك نحصل هنا على نظرية نيوتن دون اي افتراض خاص ، بينما اضطر نيوتن الى ادخال فرضية ان قوة التجاذب المتبادل بين نقطتين ماديتين متناسبة عكسيا مع مربع المسافة بينهما . واذا زدنا في دقة الحسابات تظهر انحرافات عن نظرية نيوتن ، لكن جميع هذه الانحرافات تقريبا قد تتملص عمليا ، بسبب ضآلتها ، من محك الرصد التجريبي .

وهنا يجب ان نلفت النظر الى احد هذه الانحرافات . ان الكوكب ، بموجب نظرية نيوتن ، يدور حول الشمس في مدار اهليلجي موضعه ثابت دوما بالنسبة للنجوم الثابتة ، اذا صرف النظر عن حركة هذه النجوم وعن تأثير الكواكب الاخرى في الكوكب المدروس . واذا ادخلنا على حركة الكوكب التصحيحات الناجمة عن الكواكب الاخرى ، واذا كانت نظرية نيوتن صحيحة بالضبط ، فاننا سنجد حتما ان المدار اهليلجي وثابت الموضع بالنسبة للنجوم الثابتة . ان هذا الاستنتاج الذي يمكن وضعه على محك الرصد الدقيق قد تأكد من اجل كل الكواكب الا واحدا وبدقة امكن الوصول اليها بمهارة بفضل الارصاد التي تمت مؤخرا . والشذوذ الوحيد يأتي من عطارد ، اقرب الكواكب الى الشمس . ومعروف ، منذ عصر لوفرييه LEVERRIER .

ان اهليلج مدار عطارد ، بعد تصحيح حسابه بتأثير ما ذكر اعلاه ، ليس مستقرا في موضعه بالنسبة للنجوم الثابتة ، بل انه يدور بسرعة بطيئة جدا في مستوي المدار وفي اتجاه الحركة المدارية . وقد قيست سرعة دوران هذا الاهليلج فوجد انها تساوي ٤٣ ثانية قوسية في القرن الزمني الواحد بارتياب لايزيد عن بضع ثوان قوسية . ان هذه الظاهرة يمكن تفسيرها ، في الميكانيك التقليدي ، بالاعتماد على فرضيات ضئيلة الاحتمال ، اخترعت خصيصا لهذا الفرض فقط .

اما في نظرية النسبية العامة فقد وجد ان الاهليلج المداري لكل كوكب حول الشمس يجب حتما ان يدور بالصورة المشار اليها : لكن سرعة الدوران هذه هي ، باستثناء حالة عطارد ، من الضآلة لدرجة يتعذر كشفها بوسائل

الرصد المتوفرة حتى اليوم ، لكنها ، في حالة عطارد ، يجب ان تبلغ ٤٣ ثانية قوسية في القرن ، وهي نتيجة تتفق بدقة كبيرة مع نتيجة الرصد الفلكي .

وفيما عدا ذلك ، امكن الحصول من هذه النظرية على استنتاجين يمكن وضعهما على محك الرصد وهما : انحناء الاشعة الضوئية بفعل حقل الشمس التثاقلي(١) ، وانزياح اماكن الخطوط الطيفية ، الواردة الينا من النجوم الكبيرة ، بالنسبة لاماكن الخطوط الطيفية التي نولدها بوسائل مماثلة في المخبر (من نفس الجنس من الذرات)(٢) . وهذان الاستنتاجان تأكدا كلاهما .



(١) ــ كشفه ايدنغتون EDDINGTON وسواه للمرة الاولى عام ١٩١٩ . (انظر الملحق ٣) .

(٢) ــ كشفه آدمز ADAMS عام ١٩٢٤ . (انظر الملاحظة في ذيل الملحق ٣) .

القسم الثالث

تأملات في العالم الكوني بمجمله

٣ ـ مصاعب نظرية نيوتن في معرفة العالم الكوني

بالاضافة الى الصعوبة التي ناقشناها في الفصل ٢١ يوجد صعوبة ثانية في علم الميكانيك السماوي ، كان الفلكي سيليجر SEELIGER ، في حدود علمي ، اول من ناقشها بالتفصيل . اذا تفكرنا في مسألة الكيفية التي يجب ان ننظر بها الى العالم بمجمله فان اول جواب يخطر على البال هو يقينا التالي : ان العالم الكوني لامتناه فيما يخص المكان (والزمان) . اذ ثمة نجوم في كل مكان والدرجة ان كثافة المادة ، رغم تفاوتها الكبير بين حيز وآخر تتفاوت مع ذلك حول قيمة وسطية واحدة . وبتعبير آخر : مهما توغلنا بعيدا في الفضاء سنجد في كل مكان سربا محدودا من النجوم الثابتة من جنس واحد ومن كثافة واحدة تقريبا .

ان هذه الصورة لا تنسجم مع نظرية نيوتن . فهذه النظرية تتطلب بالاحرى وجود نوع من المركز تكون فيه كثافة النجوم عظمى ، ويجب على هذه الكثافة ان تتناقص لدى الابتعاد عن هذا المركز حتى تتلاشى على مسافات ساحقة يأتي بعدها منطقة لا متناهية من الخلاء . فالعالم النجمي يجب ان يكون جزيرة محدودة الاتساع في بحر من الفضاء اللامتناهي(١) .

---

(١) ـ البرهان ـ تدل نظرية نيوتن على ان عدد « خطوط القوة » الاتية من اللانهاية والمنتهية على الكتلة m متناسب مع الكتلة m . فاذا كانت الكثافة الكتلية ρ_0 ثابتة وسطيا عبر العالم فان اي حجم كروي V سيحوي الكتلة الوسطية $\rho_0 V$ ، مما يجعل عدد خطوط القوة التي تخترق السطح الكروي F نحو الداخل متناسبا مع $\rho_0 V$. فعدد الخطوط التي تدخل عبر واحدة المساحة من هذا السطح متناسب اذن مع $\rho_0 \frac{V}{F}$ ، اي مع PR. (R : نصف قطر الكرة) . فشدة الحقل عند السطح يجب بالتالي ان تصبح لا متناهية في الكبر عندما يتعاظم نصف القطر R ، وهذا مستحيل .

ان هذه الفكرة ليست مرضية جدا بحد ذاتها . وتتناقص معقوليتها اكثر لانها تنتهي بنا الى القول بأن الضوء الصادر عن النجوم ، وكذلك افراد المجموعة النجمية ، تمر بصورة دائمة الى الفضاء اللامتناهي ، دون عودة ودون ان تدخل مرة اخرى في تفاعل مع اجرام الطبيعة الاخرى . ان عالما ماديا من هذا القبيل لا بد ان يؤول ، حتما بالتدريج ، الى ما يشبه العدم .

وللخروج من هذا المأزق اقترح سليجر تعديلا على قانون نيوتن ، افترض فيه ان قوة التجاذب بين كتلتين تتناقص ، عندما تتعاظم المسافة بينهما ، بأشد مما ينتج من قانون مقلوب مربع المسافة . وبهذه الوسيلة يمكن للكثافة المادية الوسطية ان تكون ثابتة في كل حيز ، حتى في اللانهاية ، دون ان يؤدي ذلك الى نشوء حقول تثاقل لامتناهية الشدة . وبذلك نتخلص من الفكرة البغيضة القائلة بان الكون يجب ان يتضمن شيئا يشبه المركز . لكن من الواضح اننا نشتري خلاصنا من المصاعب الاساسية المذكورة ، بالثمن الذي هو تعديل قانون نيوتن وتعقيده ، هذا القانون الذي يفتقر الى الاساسين التجريبي والنظري معا . فنحن نستطيع ان نتخيل عددا لا يحصى من القوانين التي يمكن ان تؤدي المهمة ذاتها ، دون ان نتمكن من تقديم سبب يجعلنا نفضل احدها على الآخرين ، لان اي واحد من هذه القوانين لن يستند الى أسس مبدئية نظرية عامة اضعف من الاسس التي يستند عليها قانون نيوتن .



٢١ - إمكانية عالم « منتهٍ » و « لامحدود » معاً.

لكن التفكير في بنية العالم يتحرك ايضا في اتجاه آخر تماما . فتطور علم الهندسة اللااقليدية يقود ابلى الاعتراف بواقع اننا نستطيع ان نشك في **لانهائية** فضائنا دون ان ندخل في تعارض ، لا مع اصول التفكير ولا مع التجربة (ريمان ، هلمهولتز HELMHOLTZ) . وقد عالج هلمهولتز وبوانكاريه POINCARE هذه المسائل بالتفصيل وبوعي لا يعلو عليه وعي ، لدرجة انني لن استطيع سوى التلميح اليها هنا .

فقبل كل شيء نتصور كونا ذا بعدين مكانيين ، وكائنات مسطحة مزودة بآلات مسطحة ، وخصوصا بقضبان قياس صلبة مسطحة ، وحرة الحركة في **مستو** . فبالنسبة لهذه الكائنات لا يوجد اي شيء خارج هذا المستوى : كل ما يلاحظونه من احداث تقع لهم او لـ « اشيائهم » هو ما تتضمنه حقيقة مستويهم . فانشاءات مستوي الهندسة الاقليدية ، بصورة خاصة ، يمكن ان تتم بواسطة القضبان ، كالانشاء الشبكي الذي عرضناه في الفصل (٢٤) . فعالم هذه الكائنات هو ، بخلاف عالمنا ، عالم ذو بعدين ، لكنه ، كعالمنا ، واسع الى اللانهاية . كما يوجد في عالمهم مكان لعدد لامتناه من المربعات المتساوية المصنوعة من قضبان ، اي ان حجم (سطح) هذا المكان لامنته . فاذا قالت هذه الكائنات ان عالمها « **مستو** » فان لهذا القول معنى ، لانهم يعنون ان باستطاعتهم انجاز انشاءات لمستوي الهندسة الاقليدية بواسطة قضبانهم . وبهذا الصدد تمثل افراد قضبانهم المسافة نفسها دوما ، وبصورة مستقلة عن موضعها .

النتصور الآن كونا ثانيا ذا بعدين ايضا ، ولكنه هذه المرة سطح كروي بدلا من سطح مستو . والكائنات المسطحة بقضبان قياسها واشيائها الاخرى منطبقة تماما على هذا السطح ولا تستطيع مغادرته . ان كل عالمهم المحسوس

لا يتعدى سطح الكرة . فهل بامكان هذه الكائنات ان تعتبر هندسة عالمها هندسة مستوية وتعتبر مع كل هذا قضبانها تجسيدا لـ « المسافـة » ؟ ليس بامكانهم ذلك . لانهم لو حاولوا ان يحققوا خطا مستقيما فسيحصلون على منحنٍ ندعوه نحن « الكائنات ذات الابعاد الثلاثة » دائرة عظمى ، اي خطا مغلقا على نفسه وذا طول منته ومعين ويمكن ان يقاس بواسطة قضبان القياس . وبذلك يكون لهذا العالم مساحة منتهية يمكن تشبيهها بمساحة مربع منشأ بالقضبان . ان الروعة العظيمة التي تبرز من هذه المحاكمة تكمن في التعرف على واقع ان **عالم هذه الكائنات منته وليس له مع ذلك حدود .**

لكن كائنات السطح الكروي لا تحتاج لدورة كاملة كي يكتشفوا انهم لا يعيشون في عالم اقليدي . بل يستطيعون ان يقتنعوا بذلك في كل جزء من « عالمهم » شرط ان لا يستعملوا قطعة منه اصغر من اللازم . ولاجل ذلك يرسمون « خطوطا مستقيمة » (وهي اقواس من دوائر ، في عالم الابعاد الثلاثة) تنطلق من نقطة واحدة وبطول واحد في كل الاتجاهات . انهم سيطلقون اسم « دائرة » على الخط الذي يصل بين نهايات هذه الخطوط . ففي سطح مستو يكون حاصل قسمة محيط الدائرة على قطرها ، مقاسين بقضيب واحد، مساويا وفق الهندسة الاقليدية في المستوي العدد الثابت ..... 3,14 = π المستقل عن قيمة القطر . لكن كائناتنا المسطحة ستجد على سطحها الكروي ان حاصل القسمة هذا يساوي القيمة :

$$\pi \frac{\sin\left(\frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)},$$

اي قيمة اصغر من π ، ويكون الفرق اكبر كلما كان نصف قطر الدائرة قريب القيمة من نصف قطر « العالم الكروي » R . وبواسطة هذه العلاقة يمكن لكائنات السطح الكروي ان يحسبوا نصف قطر كونهم العالمي (العالم) حتى عندما يستخدمون قسما صغيرا فقط من عالمهم الكروي في سبيل ذلك . ولكن اذا كان هذا القسم صغيرا جدا في الواقع فلن يستطيعوا البرهان على انهم يعيشون على « عالم » كروي لا على عالم اقليدي مستو .

لان القسم الصغير من السطح الكروي لا يختلف الا قليلا عن قطعة مستوية ذات اتساع مساو .

وهكذا ، اذا كانت كائنات السطح الكروي تعيش على كوكب لا تحتل منظومته الشمسية سوى جزء صغير مهمل من الكون الكروي ، فلن يكون لديهم وسيلة لمعرفة فيما اذا كانوا يعيشون في كون منته ام لا منته . لان « جزء الكون » الذي يطالونه هو في الحالتين مستويا عمليا ، او اقليديا . وينتج مباشرة من هذه المناقشة ومن اجل كائنات السطح الكروي ان محيط الدائرة يتزايد اولا مع نصف قطرها حتى يصل الى « محيط دائرة الكون » ، ثم يتناقص تدريجيا الى الصفر مع استمرار تزايد نصف القطر . وخلال هذه العملية تستمر مساحة الدائرة في التزايد أكثر فأكثر حتى تصبح مساوية للمساحة الكلية لمجمل « كرة العالم » .

هذا وربما يتساءل القارىء لماذا وضعنا « الكائنات » على سطح كروي بدلا من سواه من السطوح المغلقة . ان هذا الاختيار له ما يسوغه في واقع ان السطح الكروي ، بخلاف سواه ، هو السطح الوحيد الذي يتمتع بخاصة ان كل نقاطه متكافئة . وانا اقبل ان نسبة المحيط C للدائرة على نصف قطرها r تتعلق بـ r ، اما من اجل قيمة معينة لـ r فطول المحيط هو نفسه من اجل كل نقطة من « العالم ــ الكرة » ، وبتعبير آخر نقول ان « العالم الكرة » هو « سطح ذو انحناء ثابت » .

يوجد لهذا الكون الكرة ذي البعدين شبيه ذو ثلاثة ابعاد ، هو ، بالاسم ، الفضاء الكروي الثلاثي الابعاد الذي اكتشفه ريمان . ونقاطه متكافئة بالمعنى السابق نفسه . وهو ذو حجم منته يتعين بنصف قطره $(2\pi^2R^3)$ ؛ فهل من الممكن تصور فضاء كروي ؟ ان تصور الفضاء لا يعني سوى ان نتصور مختصرا لخبرتنا عن « الفضاء » ، اي للخبرة التي نستطيع ان نكتسبها من حركة الاجسام « الصلبة » . وبهذا المعنى نستطيع ان نتصور فضاء كرويا .

لنفترض اننا ننشيء مستقيمات او اوتارا مشدودة في كل الاتجاهات انطلاقا من نقطة ، واننا نقتطع من كل منها مسافة واحدة r بواسطة قضبان

قياس . فالاطراف الاخرى السائبة لهذه الاطوال واقعة على سطح كروي . نستطيع ان نقيس المساحة F لهذا السطح بواسطة مربعات مصنوعة من قضبان القياس . فاذا كان الكون اقليديا يكون $F = 4\pi r^2$ ، اما لو كان كرويا لكان F اصغر من $4\pi r^2$ دوما . ولدى ازدياد r تزداد F من الصفر الى قيمة عظمى تتعين بـ « نصف قطر العالم » . لكن استمرار r في التزايد يجعل المساحة تتناقص تدريجيا حتى الصفر . ففي البدء تتباعد فيما بينها المستقيمات المنطلقة من النقطة اكثر فأكثر ، ثم تعود فتتقارب حتى تتجمع من جديد في « نقطة مقابلة » لنقطة الانطلاق . وعندئذ تكو قد اخترقت الفضاء الكروي كله . وبذلك نرى ان الفضاء الكروي ذا الابعاد الثلاثة يماثل تماما السطح الكرواي ذات البعدين . فهو منته (اي ذو حجم محدود) وليس له حدود .

ويمكن ان نذكر انه يوجد مع ذلك نوع آخر من الفضاء المنحني : « الفضاء البيضوي » . ويمكن ان يتخذ فضاء منحنيا تتماثل « نقطتاه المتقابلتان » (لا يمكن التمييز بينهما) . فالكون البيضوي يمكن ان يعتبر ، بمعنى ما ، كونا منحنيا ذا تناظر مركزي .

ينتج مما تقدم اننا نستطيع ان نتصور فضاءات مغلقة وبدون حدود . ومن بين هذه الفضاءات يسمو الفضاء الكروي (والبيضوي) ببساطته ، لان كل نقاطه متكافئة . وبنتيجة هذه المناقشة تبرز للفلكيين وللفيزيائيين مسألة اكبر اهمية ، وهي معرفة اذا كان الفضاء الكوني الذي نعيش فيه لا منتهيا أم منتهيا باسلوب الكون الكروي . ان تجربتنا بعيدة عن ان تتيح لنا الاجابة عن هذا السؤال . لكن نظرية النسبية العامة تضعنا على طريق الجواب بدرجة معتدلة من اليقين ، وبهذا الصدد نجد حلاً للصعوبة المذكورة في الفصل (٣٠) .

* * *

٣٢ ـ بنية المكان بموجب نظرية النسبية العامة

ان الخصائص الهندسية للفضاء ليست ، في عرف نظرية النسبية العامة، مستقلة بحد ذاتها ، الكنها تتعين بالمادة . وبذلك يمكن ان نستخلص نتائج بخصوص البنية الهندسية للعالم الكوني اذا استندنا فقط في تأملاتنا الى حالة المادة كشيء معلوم ، فنحن نعلم من الخبرة انه ، لدى اختيار جملة احداثيات ملائمة ، تكون سرع النجوم صغيرة اذا قورنت بسرعة الضوء . ونستطيع بذلك ان نتوصل الى نتيجة تشكل معرفة تقريبية بطبيعة العالم الكوني بمجمله ، اذا اعتبرنا المادة وكأنها في حالة سكون .

لقد عرفنا منذ قليل من مناقشتنا السابقة ان سلوك قضبان القياس والميقاتيات يتأثر بالحقل التثاقلي ، اي بتوزع المادة . وهذا بحد ذاته كاف لنفي امكانية ان تكون الهندسة الاقليدية صالحة بالضبط في عالمنا الكوني . لكننا يمكن ان نقبل انه لا يختلف الا قليلا عن العالم الاقليدي ، وان هذه الفكرة تبدو هي الاكثر احتمالا ، لان الحسابات تظهر ان خصائص القياسات المساحية للفضاء المحيط بنا لا تتأثر الا قليلا جدا بالكتل حتى ولو بلغت قيمة كتلة شمسنا . ويمكن ان نتخيل ، من وجهة نظر هندسية ، ان عالمنا يتصرف بشكل مشابه لسطح ذي تضاريس في بعض مناطقه المنفردة ، ولكنه لا يختلف في معظم امتداده عن المستوي اختلافا محسوسا : فهو يشبه سطح بحيرة تجعده المويجات . فمثل هذا العالم يمكن ان يسمى ، بشكل مناسب ، شبه اقليدي . وفيما يتعلق بامتداده ، لا بد ان يكون لا منتهيا . لكن الحسابات تكشف ان الكثافة الوسطية للمادة في عالم شبه اقليدي لا بد ان تكون بالضرورة معدومة . فمثل هذا العالم لا يمكن ان تحتل المادة كل مكان فيه : فهو لا بد ان يظهر لنا بصورة غير مرضية كنا رسمناها في الفصل (٣٠) .

ولو كنا ازاء عالم ذي كثافة مادية وسطية تختلف عن الصفر ، مهما كانت ضئيلة ، فلا يمكن عندئذ ان يكون شبه اقليدي . اما اذا كانت المادة موزعة توزيعا متساويا ، فان العالم سيكون بالضرورة كرويا (او بيضويا) . ولما كان التوزيع التفصيلي للمادة في واقعه غير منتظم فان العالم الحقيقي منحرف في مفردات اجزائه عن البنية المتكورة ، اي انه شبه كروي . لكنه لا بد ان يكون منتهيا . والواقع ان النظرية تزودنا بعلاقة(١) بسيطة بين الامتداد المكاني للعالم وبين كثافة المادة فيه .



---

(١) ـ نحصل على « نصف قطر » العالم ، R ، من المعادلة : $R^2 = \frac{2}{\kappa \rho}$.

ففي جملة واحداث القياس السفثية تعطي هذه المعادلة : $\rho \frac{2}{} = 1{\cdot}08.10^{27}$

هي الكثافة المادية الوسطية ، و K ثابت له علاقة بثابت التثاقل النيوتني .

الملحـــق « ١ »

طريقة بسيطة لاستنباط تحويل لورنتس

« اضافــة للفصــل ١١ »

التوجه النسبي لجملتي الاحداثيات مرسوم في الشكل (٢) ، حيث المحورنا X و X' منطبقان دوما . وفي الملحق الراهن يمكن ان نشطر المسافةشطرين بأن نفحص اولا وحصرا حوادث تقع على المحور x . وكل حادث من هــذا النوع يتمثل بالنسبة لجملة الاحداثيا ت K بفاصلته X وبالزمن t ، وبالنسبة للجملة K' بالفاصلة x' وبالزمن t' . وهدفنا ايجاد X' و t' عندما نعرف X و t .

اشارة ضوئية تسير على طول الاتجاه الموجب للمحور X وفقا للمعادلة:

$$x = ct$$

او $$x - ct = 0 \qquad (١)$$

وبما ان الاشارة الضوئية نفسها تسير بالنسبة لـ K' بالسرعة C ايضا ، فان لنا الصيغة المشابهة :

$$x' - ct' = 0 \qquad (٢)$$

ان هاتين النقطتين المكانيتين ـ الزمانيتين (الحادثين) اللتين تستجيبان لـ (C) ايضــا . ومن الواضح ان هذا يتحقق عندما تتحقق عموما العلاقة :

$$(x' - ct') = \lambda(x - ct) \qquad (٣)$$

حيث λ تمثل ثابتا ، لان (٣) تدل على ان انعدام $(x-ct)$ يؤدي الى انعدام $(x'-ct')$.

واذا كررنا المحاكمة نفسها على اشارة ضوئية تسير في الاتجاه السالب على المحور X ، نجد الشرط :

$$(x'+ct')=\mu(x+ct) \qquad (٤)$$

وباضافة المعادلتين (٣) و (٤) طرفا الى طرف ، ثم بطرحهما طرفا من طرف ، وبادخال الثابتين الآخرين a و b ، بدلا من λ و μ . لاسباب تسهيلية ، حيث :

$$a=\frac{\lambda+\mu}{2}$$

$$b=\frac{\lambda-\mu}{2},$$

نحصل على المعادلتين :

$$\left.\begin{aligned} x' &= ax-bct \\ ct' &= act-bx \end{aligned}\right\} \qquad (٥)$$

وبذلك سنجد حل مسألتنا اذا عرفنا الثابتين a و b . وهما ينتجان من المحاكمة التالية .

من اجل اصل (مركز) الجملة K' لدينا دوما $x'=0$ ، وبذلك تعطينا اولى المعادلتين (٥)

$$x=\frac{bc}{a}t.$$

واذا رمزنا V لسرعة اصل K' بالنسبة لـ K يكون لنا :

$$v=\frac{bc}{a}. \qquad (٦)$$

ان نفس قيمة V يمكن ايجادها من المعادلتين (٥) اذا حسبنا سرعة نقطة اخرى من K' بالنسبة لـ K ، او سرعة نقطة من K بالنسبة لـ K' (وهي موجهة بالاتجاه السالب للمحور X) . وبموجز القول نستطيع ان نسمي V السرعة النسبية للجملتين .

وفوق ذلك ، يعلمنا مبدأ النسبية اننا لو نظرنا من K الى قضيب واحدة الطول الساكن في K' على طول المحور x' ، فسيكون طوله مساويا طول قضيب واحدة الطول الساكن على المحور X في K كما يبدو من K' . ولكي نرى كيف تظهر نقاط المحور x' منظورة من الجملة K يكفي ان نلتقط « صورة خاطفة » لـ K' من K ، وهذا يعني ان علينا ان نعطي قيمة خاصة لـ t (زمن K) ، ولتكن $t=0$. (1) . فمن اجل قيمة t هذه ، نجد من اولى المعادلتين (٥) :

$$x'=ax.$$

فالنقطتان ، من المحور x' ، المفصولتان المسافة $\Delta x'=1$ المقيسة في K' تبدوان على الصورة الخاطفة مفصولتين بالمسافة :

$$\Delta x=\frac{1}{a} \qquad (٧)$$

ولكن لو التقطت الصورة الخاطفة من K' $(t'=0)$ ، ولو اسقطنا t من بين المعادلتين (٥) ، واخذنا الصيغة (٦) بعين الاعتبار ، نجد :

$$x'=a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)x.$$

ومن هنا نستنتج ان النقطتين من المحور X المفصولتين بالمسافة 1 (بالنسبة لـ K) ستتمثلان على صورتنا الخاطفة بالمسافة :

$$\Delta x'=a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad (٧ ب)$$

لكن الصورتين الخاطفتين هما ، بموجب ما قلنا ، متماثلتان تماما ، وهذا يعني ان Δx الواردة في (٧) يجب ان تساوي $\Delta x'$ الواردة في (٧ ب) ، مما يعطي :

$$a^2=\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (٧ ج)$$

(1) ــ لحظة التقاط الصورة الخاطفة (المترجم) .

ان المعادلتين (٦) و (٧ ج) تعينان الثابتين b , a . فاذا وضعنا قيمتي هذين الثابتين في (٥) نحصل على المعادلتين الاولى والرابعة الواردتين في الفصل ١١ ، اي :

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \qquad (٨)$$

وهكذا حصلنا على تحويل لورنتس من اجل حادثين على المحور X ، وهو يستجيب للشرط :

$$x'^2 - c^2t'^2 = x^2 - c^2t^2 \qquad (٨ ب)$$

هذا وان تعميم هذه النتيجة كي تضم الحوادث التي تقع خارج المحور X يتم بالاحتفاظ بالمعادلتين (٨) مع العلاقتين الاضافيتين :

$$\left.\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \qquad (٩)$$

وبذلك نستجيب لمسلمة ثبات سرعة الضوء في الخلاء بالنسبة للجملتين K و K' معا ومهما كان منحى انتشاره . ويمكن ان نثبت ذلك كما يلي .

نفترض اشارة ضوئية من نقطة اصل K في الزمن $t=0$. انها تنتشر وفق المعادلة :

$$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2} = ct,$$

التي تعطي ، اذا ربعنا طرفيها :

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0 \qquad (١٠)$$

ان قانون انتشار الضوء ، بالاضافة الى مسلمة النسبية ، يستلزم ان يتم هذا الانتشار ـ كما يحكم عليه من K' ـ وفق المساواة :

$$r' = ct',$$

او

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=0 \quad (\text{١٠ ب})$$

ولكي تصبح المعادلة (١٠ ب) نتيجة للمعادلة (١٠) لا بد ان يكون :

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=\sigma(x^2+y^2+z^2-c^2t^2) \quad (11)$$

ولما كانت المعادلة (٨ ب) يجب ان تصلح من اجل نقاط على المحور X . نجد $\sigma = 1$. فنرى بسهولة ان تحويل لورنتس يستجيب فعلاً للمعادلة (١١) من اجل $\sigma=1$ ، لان (١١) نتيجة لـ (٨ ب) ولـ (٩) وبالتالي لـ (٨) و (٩) . وبذلك نكون قد اوجدنا تحويل الورنتس .

ان تحويل لورنتس المتمثل بـ (٨) و (٩) مازال بحاجة الى تعميم . فمن الواضح ان لا اهمية لاختيار محاور K' موازية لمحاور K . وكذلك لا اهمية لكون سرعة K' الانسحابية بالنسبة لـ K تحدث في اتجاه المحور X . وبتأمل بسيط نرى اننا قادرون على بناء تحويل لورنتس ، في معناه العام ، من نوعين من التحويلات هما : تحويل لورنتس في صيغته الخاصة ، وتحويل مكاني ــ يستهدف ابدال الاحداثيات المتعامدة بجملة احداثيات اخرى تذهب محاورها في مناح اخرى .

واخيراً يمكن ان نعرف رياضيا تحويل لورنتس العام كما يلي :
انه يعطي صيغ x' و y' و z' و t' كتوابع خطية متجانسة لـ x, y, z, t بحيث تستجيب هذه المقادير للمطابقة :

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2 \quad (\text{١١ ب})$$

اي اننا اذا بدلنا x, y, z, t في الطرف الايسر منها بتوابع التحويل العام نحصل على طرفها الايمن .



الملحق ((٢))
فضاء منكوفسكي ذو الابعاد الاربعة
((العالم))

((اضافة للفصل ١٧))

يمكن ان نصوغ تحويل لورنتس بشكل ابسط اذا ادخلنا المقدار التخيلي $\sqrt{-1}\,.\,ct$ كمتحول زماني بدلا من t . فاذا ادخلنا طبقا لذلك :

$$x_1 = x$$
$$x_2 = y$$
$$x_3 = z$$
$$x_4 = \sqrt{-1}\,.\,ct$$

وكذلك الامر من اجل الجملة K' ، فان شرط التطابق الذي يستجيب له تحويل لورنتس يصبح :

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad (١٢)$$

تلك هي صيغة المطابقة (١١ ب) لدى استعمال « الاحداثيات » الجديدة. ونرى ، في (١٢) ان الاحداثي التخيلي الزمني x_4 يدخل في شرط التحول كما تدخل الاحداثيات المكانية x_1, x_2, x_3, x_4 . وهذا ناجم ، طبقا لنظرية النسبية ، عن واقع ان « الزمن » x_4 يدخل في القوانين الطبيعية كما تدخل المتحولات المكانية x_1, x_2, x_3 .

ان المتصل ذا الابعاد الاربعة المعرف ب « الاحداثيات » x_1, x_2, x_3, x_4 سماه منكوفسكي « العالم » ، كما اطلق على « النقطة ـ الحادث » اسم « نقطة العالم » . فبعد ان كانت الفيزياء « حوادث » في الفضاء ذي الابعاد الثلاثة عادت ، كما كانت ، « وجودا » في « عالم » رباعي الابعاد .

ان « العالم » الرباعي الابعاد يماثل جيدا « الفضاء » الثلاثي الابعاد للهندسة التحليلية (الاقليدية) . فاذا ادخلنا في هذه الهندسة جملة احداثيات ديكارتية جديدة x'_1, x'_2, x'_3 تنطلق من نقطة الاصل نفسها ، فان x'_1, x'_2, x'_3 هي توابع خطية متجانسة لـ x_1, x_2, x_3 تستجيب للمعادلة :

$$x_1'^2+x_2'^2+x_3'^2=x_1^2+x_2^2+x_3^2.$$

ذات التشابه الاضح مع (١٢) . نستطيع اذن ان نتخذ شكليا « عالم منكوفسكي » كفضاء اقليدي رباعي الابعاد (مع احداثي زمني تخيلي) ، وعندئذ يعبر تحويل لورنتس عن « دوران » جملة الاحداثيات في « العالم » ذي الابعاد الاربعة .



الملحـــــق ((٣))

الاثبات التجريبي لنظرية النسبية العامة

نستطيع من الناحية النظرية المنهجية ، ان نتصور آلية تطور العلـم التجريبي كعملية استقراء مستمرة . فالنظريات تستولد وتصاغ في اطـر ضيقة كمقولات عن عدد كبير من الملحوظات بشكل قوانين تجريبيـة يمكن ان توضع القوانين العامة على محكها . وفي هذا الاسلوب يبدو تطور العلـم ذا شبه بعملية تجميع جدول مصنف . فهو بذلك محاولة اختبارية بحتة .

لكن هذه النظرة لا تشمل بأية صورة مجمل التطور الفعلي ، لانه يرتبط بالدور الهام الذي يلعبه الحدس والفكر الاستنتاجي في تطور العلوم الدقيقة . وفي الوقت الذي يشهد بروز علم من مراحلة الاولى ،لا يتم انجاز التقدم النظري عن طريق عملية احكام بحتة . فالباحث يفضل ان يسعى ، مستهديا بخبرتـه التجريبية ، الى تنمية منظومة من الافكار يستخدم عموما المنطق في بنائهـا من عدد صغير من الافتراضات الاساسية التي تسمى مسلمات . ونطلـق على مجموعة الافكار التي من هذا النوع اسم نظرية . فالنظرية تجد مسوغ وجودها في واقع انها تربط فيما بين عدد كبير من الارصاد ، وفي هذه الناحيـة بالذات تكمن « حقيقة » النظرية .

هذا ويمكن ان توجد عدة نظريات تتعلق بمجموعة واحدة من المعطيات التجريبية وتختلف فيما بينها اختلافا بينا . بيد انها فيما يخص النتائج التي يمكن ان تقود اليها ، قد يكون الاتفاق فيما بين النظريات تاما لدرجة يصعب معها ان نجد اي استنتاج تختلف فيه نظريتان . وكمثال على ذلك نشير الى ما هو معروف في علم البيولوجيا ، في نظرية داروين DARWIN في تطور الانواع بالاصطفاء من خلال الصراع على البقاء ، وفي نظرية التطور المستندة

الى فرضية انتقال الصفات المكتسبة عبر الوراثة . ولدينا نموذج آخر للاتفاق الجيد بين نتائج نظريتين هما ميكانيك نيوتن من جهة ونظرية النسبية العامة من جهة اخرى . وهذا الاتفاق يصل لدرجة اننا لم نتمكن حتى اليوم من العثور الا على بضع نتائج من نظرية النسبية العامة نستطيع تحريها ولم يمكن استنتاجها من فيزياء ما قبل النسبية ، وذلك رغم الفرق العميق في الافتراضات الاساسية بين النظريتين . وسنفحص مرة اخرى فيما يلي هذه النتائج الهامة كما سنناقش البنية التجريبية المنتمية لكليهما والتي حصلنا عليها حتى الآن .

آ ـ حركة حضيض فلك عطارد

يدل ميكانيك نيوتن وقانونه في التثاقل على ان (الكوكب) السيار حول الشمس لا بد ان يرسم اهليلجا حولها ، او ، بتعبير ادق ، حول مركز ثقل الشمس والكوكب . وفي مثل هذه المنظومة تحتل الشمس ، او مركز الثقل المشترك ، احد محرقي المدار الاهليلجي بحيث تتزايد المسافة ، في السنة الكوكبية الواحدة ، بين الشمس والكوكب من قيمة صغرى الى قيمة عظمى ثم تعود فتتناقص الى القيمة الصغرى وهكذا . لكننا اذا ادخلنا في الحساب ، بدلا من قانون نيوتن ، قانون تجاذب يختلف عنه قليلا فسنجد ، بموجب هذا القانون الجديد ، ان الحركة تظل متسمة بالتغير الدوري للمسافة بين الشمس والكوكب لكن الزاوية التي يمسحها المستقيم الواصل بينهما اثناء هذا الدور (حضيض ـ الموقع الاقرب الى الشمس ـ الى حضيض) ستختلف عن ٣٦٠° . اي ان خط المدار لن يكون مغلقا على نفسه بل سيملأ حيزا حلقيا من مستوي المدار ، وهو الحيز الحلقي المحصور بين دائرة الحضيض (نصف قطرها المسافة بين الشمس والحضيض) وبين دائرة الاوج (ابعد نقطة ، من المدار ، عن الشمس) .

وبموجب نظرية النسبية العامة ، وهي تختلف طبعا عن نظرية نيوتن ، يجب ان تختلف حركة الكوكب في مداره عن حركة نيوتن ـ كبلر بفرق يتمثل

بأن الزاوية التي يمسحها المستقيم الواصل بين الشمس والكوكب ، من حضيض الى الذي يليه ، تزيد عن دورة كاملة واحدة بمقدار يساوي :

$$+\frac{24\pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1-e^2)}$$

(ان الدورة الكاملة الواحدة تقابل زاوية تساوي ٢ π راديان ، وهذه الصيغة تعطي الزيادة الزاوية ــ عن ٢ π ــ التي يمسحها المستقيم شمس ــ كوكب اثناء الفاصل الزمني بين حضيضين متواليين) وتمثل a في هذه الصيغة نصف القطر الكبير للاهليلج ، وتمثل e تباعده المركزي ، و c سرعة الضوء و T زمن الدورة الواحدة الكاملة . يمكن ايضا ان ننص على هذه النتيجة بما يلي : بموجب نظرية النسبية العامة ، يدور المحور الكبير للاهليلج حول الشمس بنفس جهة دوران الكوكب في مداره . ويدل الحساب على ان سرعة هذا الدوران يجب ان تكون ٤٣ ثانية قوسية في القرن الزمني من اجل الكوكب عطارد ، اما من اجل الكواكب الاخرى في منظومتنا الشمسية فان هذه السرعة صغيرة لدرجة يكاد يتعذر كشفها(١) .

وواقع الامر ان الفلكيين ايقنوا ان نظرية نيوتن لا تكفي لحساب حركة عطارد المرصودة بالدقة التي بلغتها اليوم عمليات الرصد الفلكي . فهم بعد ان حسبوا حساب كل التأثيرات المخلة بحركة عطارد ، وجدوا (لوفرييه LEVRRIER ــ ١٨٥٩ ــ ونيوكمب NEWCOMB ــ ١٨٩٥) انه ما يزال لديهم حركة حضيضية لمدار عطارد لم يتمكنوا من تعليلها ، وسرعة هذه الحركة لا تختلف بفرق محسوس عن ٤٣ ثانية قوسية في القرن . فهذا الفرق لا يتجاوز بضع ثوان فقط .

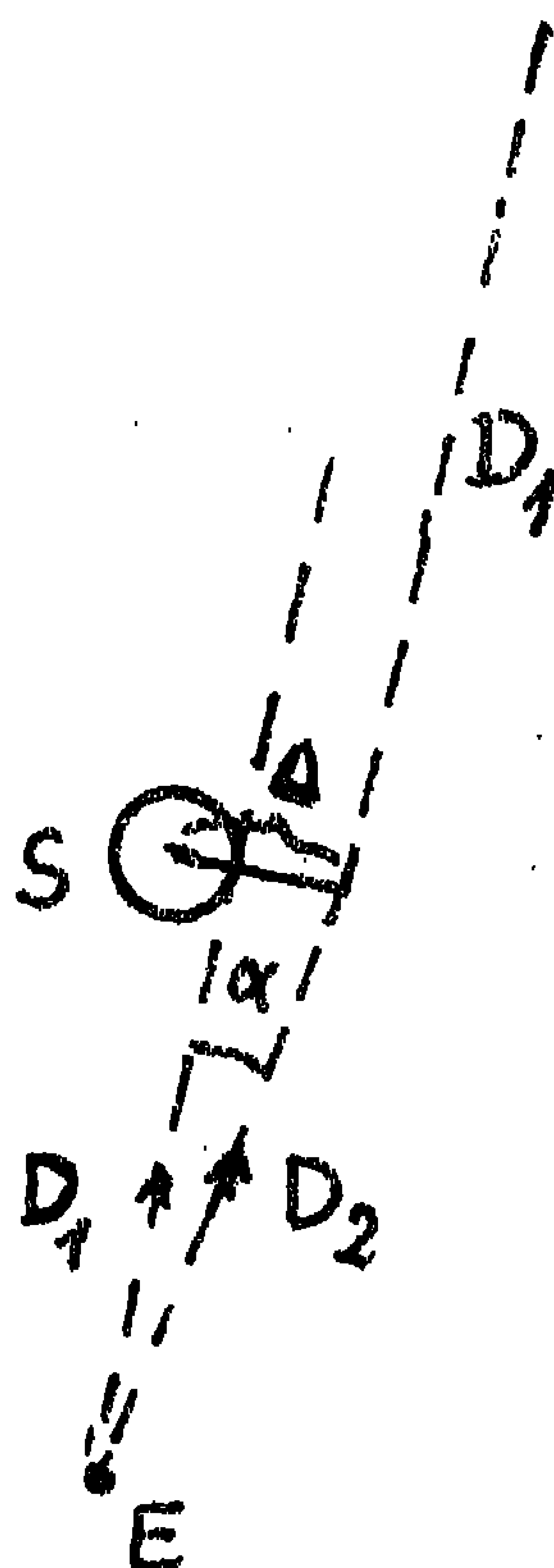
ب ــ انعطاف الضوء بفعل الحقل التثاقلي

لقد ذكرنا في الفصل (٢٢) ان الشعاع الضوئي يعاني ، طبقا لنظرية النسبية العامة ، انعطافا في مساره عندما يخترق حقلا تثاقليا ، وهو انحناء يشبه

(١) ــ وخصوصا في مدار كوكب الزهرة : فهو دائري جدا ، مما يتعذر معه تعيين نقطة حضيضه بدقة .

الانحناء الذي يعانيه جسم مادي مقذوف عبر حقل تثاقلي . وتتوقع النظرية ان الشعاع الضوئي الذي يمر بالقرب من كتلة مادية ثقيلة ينعطف نحوها . ومن اجل شعاع يمر مساره قرب الشمس وعلى مسافة قطرية من مركزها تساوي Δ ، تدل النظرية ان زاوية هذا الانعطاف تساوي (شكل ٥) .

$$\alpha = \frac{1.7 \text{ ثانية قوسية}}{\Delta}$$



الشكل رقم ـ ٥ ـ

ويمكن ان نضيف بموجب النظرية ، ان نصف هذا الانعطاف α ناجم عن حقل الجاذبية النيوتني للشمس والنصف الآخر عن الاختلال الهندسي (الانحناء) الذي تولده الشمس في الفضاء القريب منها .

يمكن ان نضع هذه النتيجة على محك القياس بتصوير النجوم اثنــاء كسوف كلي للشمس . والسبب الوحيد الذي يجعلنا ننتظر كسوفا كليــا يعود الى ان الجو الشمسي، في غير هذه الظروف ، مضاء لدرجة عالية تجعل النجوم الواقعة قرب قرص الشمس غير مرئية . ان هذه الظاهرة المتوقعــة يمكن ان تفهم تماما في مخطط الشكل (٥) . فلولا وجود الشمس S لرأينا النجم ، وهو على مسافة لا متناهية عمليا ، من الارض E في المنحــى D_1 . لكننا ، بسبب انعطاف الضوء الآتي من النجم قرب الشمس ، نرى النجم في المنحى D_2 ، اي في مكان ابعد قليلا ، عن حافة قرص الشمس ، من مكانه الحقيقي .

اما عمليا فقد تم الرصد بالشكل التالي . لقد جرى تصوير النجوم القريبة من حافة الشمس اثناء كسوف كلي . ثم جرى تصوير ثان للنجوم نفسها عندما اصبحت الشمس في موضع آخر من السماء ، اي بعد (او قبل) بضعة شهور . ولدى مقارنة الصورتين يجب ان تظهر مواقع النجوم ابعد عــن الشمس في الصورة الكسوفية مما هي في الصورة الاخرى بفرق يتعلق بالزاوية α .

نحن مدينون للجمعية الملكية وللجمعية الفلكية الملكيــة بتحــري هــذه النتيجة الهامة . فدون ان تعبأ بالحرب ولا بالمصاعب المادية والنفسية الناجمة عنها ، جهزتا بعثتين ــ الى سوبرال (البرازيل) والى جزيــرة برينسيب (افريقيا الغربية) ــ وارسلتا عــددا من مشاهــير الفلكيــين (ادينغتــون EDDINGTON وكوتنغهام COTTINGHAM وكروملين CROMMLIN ودافيدسون DAVIDSON) للحصول على صور لكسوف ٢٩ أيــار ١٩١٩ . كان الاختلاف النسبي المتوقع بين الصورة الكسوفية والاخرى مــن رتبة اجزاء من الف جزء من الميليمتر فقط . تلك هي الدقة العظيمة التي يجب الحصول عليها لدى اجراءات التقاط الصور ولدى اجراء القياسات عليها .

اتت نتائج القياس مؤكدة للنظرية بشكل مرض . ونورد في الجــدول التالي المركبتين المتعامدتين للانحرافات عن الشمس المحصول عليها بالرصــد وتلك المحسوبة طبقا لنظرية النسبية العامة (بالثواني القوسية) .

رقم النجم	الاحداثي الاول		الاحداثي الثاني	
	المرصود	المحسوب	المرصود	المحسوب
11 . .	−0·19	−0·22	+0·16	+0·02
5 . .	+0·29	+0·31	−0·46	−0·43
4 . .	+0·11	+0·10	+0·83	+0·74
3 . .	+0·20	+0·12	+1·00	+0·87
6 . .	+0·10	+0·04	+0·57	+0·40
10 . .	−0·08	+0·09	+0·35	+0·32
2 . .	+0·95	+0·85	−0·27	−0·09

ج ـ انزياح الخيوط الطيفية نحو الاحمر

لقد بينا في الفصل (٢٣) ان الميقاتات المتماثلة الصنع المربوطة بجملة K' دوارة بالنسبة للجملة الفاليلية K ، والتي تعتبر ساكنة بالنسبة للجملة الدوارة ، تعمل بمعدلات متفاوتة بتفاوت اماكنها . نفحص الآن هذه القضية كميا . ان الميقاتية الموضوعة على المسافة r من مركز القرص الدوار تتحرك بالنسبة لـ K ، بالسرعة :

$$v = \omega r,$$

حيث تمثل ω سرعة الدوران الزاوية لـ K' بالنسبة لـ K . فاذا رمزنا بـ ν_0 لعدد دقات الميقاتية في واحدة الزمن (معدل الميقاتية) بالنسبة لـ K عندما تكون الميقاتية ساكنة ، ورمزنا بـ (ν) لمعدلها وهي تدور بالنسبة لـ K بالسرعة v ، ولكنها ساكنة بالنسبة للقرص K' ، كان لنا وفق ما قلناه في الفصل (١٢) :

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

او ، بدقة كافية : $\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$

وهذه الصيغة يمكن وضعها بالشكل التالي :

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\omega^2 r^2}{2} \right)$$

واذا رمزنا بـ Φ لفرق كمون القوة النابذة بين الميقاتية ومركـز القرص ، اي للعمل المعتبر سالبا والذي نصرفه على واحدة الكتلة ، ضد القوة النابذة ، كي ننقلها من مكان الميقاتية الى مركز القرص ، نجد :

$$\phi = - \frac{\omega^2 r^2}{2}$$

ومن ذلك ينتج ان : $\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\phi}{c^2} \right)$.

واول ما نراه من هذه الصيغة ان الميقاتيتين المتماثلتي الصنع تعملان بمعدلين مختلفين اذا وضعتا على مسافتين مختلفتين من مركز القرص . ان هذه النتيجة تنسحب ايضا على الراصد الدائر مع القرص .

ان الراصد الموجود على القرص يشعر انه في حقل تثاقلي ذي كمون Φ ، وبذلك تكون النتيجة التي حصلنا عليها صحيحة تماما في حقول التثاقل . ونحـن ، فوق ذلـك ، نسـتطيع ان نعتبـر الـذرة المـادية ، التي تصـدر خيوطا طيفية ، ميقاتية ذرية مما يحدو بنا لاصدار المقولة التالية :

ان الذرة تمتص او تصدر ضوءا ذا تواتر يتوقف على كمـون الحقـل التثاقلي الذي يحويها .

فتواتر الذرة الموجودة على سطح جرم سماوي سيكون اقل قليلا من تواتر الذرة الموجودة في الفضاء الحر (او على سطح جرم سماوي اصغر) . لكـن $\phi = - K\frac{M}{r}$ ، حيث K ثابت نيوتن التثاقلي و M كتلة الجرم

السماوي . وبذلك لا بد من حدوث انزياح نحو الاحمر للخيوط الطيفية الصادرة عن سطح النجوم عندما تقارن هذه الخيوط بتلك التي تصدر عن العنصر الكيميائي نفسه وهو موجود على سطح ارضنا ، وقيمة هذا الانزياح تساوي :

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{K}{c^2} \frac{M}{r}.$$

ان هذا الانزياح نحو الاحمر ، كما تتنبأ به نظرية النسبية من اجل الشمس ، يبلغ تقريبا جزئين من مليون جزء من طول الموجة . لكننا لا نستطيع اجراء حساب مضبوط لهذه الظاهرة على سطوح نجوم اخرى لاننا نجهل عموما كتلها وانصاف اقطارها .

ان قضية وجود هذا المفعول ما تزال مسألة مطروحة . ويسعى الفلكيون اليوم (١٩٢٠) بجهد دؤوب لحسم هذا الامر . فبسبب صغر هذا الانزياح في حالة الشمس ، يصعب اتخاذ موقف حول وجوده . على ان غريبيه GREBE وباشم BACHEM (في بون) ، بنتيجة قياساتهما وقياسات ايفرشيد EVERSHED وشفارتشيلد SCHWARZSCHILD ، يضعون وجود هذا الانزياح خارج دائرة الشك تقريبا ، بينما يصل باحثون آخرون ، وخصوصا سانت جون ST JOHN ، الى رأي معاكس بنتيجة قياساتهم .

ان انزياحات وسطية نحو حد اقل من المتوقع قد اكتشفت بصورة اكيدة في التحريات الاحصائية للنجوم الثابتة . لكن فحص النتائج التجريبية ، الحاصلة حتى اليوم ، لا تسمح باتخاذ قرار حاسم حول ما اذا كان بالامكان ام لا ، عزو هذه الانزياحات الى فعل التثاقل . بيد ان النتائج التجريبية قد جمعت معا ونوقشت بالتفصيل ، من وجهة النظر التي تهمنا هنا في مقالة علمية نشرها فروندليش FRUNDLICH عنوانها « نحو البرهان على نظرية النسبية العامة » في المجلة الالمانية « علوم الطبيعة » (العدد ٣٥ ، الصفحة ٥٢٠ ، عام ١٩١٩ ، الناشر : بوليوس سبرنجر ، برلين) .

وعلى كل حال فان قرارا حاسما سيتخذ خلال السنوات القليلة القادمة ، فاذا كان الحقل التثاقلي لا يولد انزياحا للخيوط الطيفية نحو الاحمر فان نظرية النسبية العامة ستصبح في مأزق صعب . اما اذا ثبت ان سبب انزياح الخيوط الطيفية هو الكمون التثاقلي ، فان دراسة هذا الانزياح ستوفر وسيلة هامة للحصول على معلومات عن كتل الاجرام السماوية .

ذيل (آ) : ان انزياح الخيوط الطيفية نحو الاحمر قد تأكد نهائيا لدى آدامز عام ١٩٢٤ ، نتيجة ارصاده لمرافق الجرم سيريوس الذي تبلغ شدة هذا المفعول على سطحه عشر مرات من شدته على سطح الشمس . (المترجم الانكليزي) .

ذيل (ب) : لقد تأكد هذا الانزياح ايضا في تجارب أرضية مخبرية من خلال ما يسمى مفعول موسباور **MOSSBAUER** الذي اخترع طريقة دقيقة جدا لقياس مثل هذه الانزياحات الضئيلة عام ١٩٦٠ (المترجم) .

* * *

الملحـــــق ((٤))

بنية الفضاء بموجب نظرية النسبية العامة

((اضافة للفصل ٣٢))

منذ نشر الطبعة الاولى لهذا الكتاب الصغير اكتسبت معرفتنا بالفضاء الكوني (المسألة الكونية) تطورا هاما لا بد من ذكره حتى في العرض المبســط للموضــوع .

ان محاكماتي كانت في البدء تستند الى فرضيتين :

١ ـ يوجد ، في الفضاء الكوني ، كثافة وسطية للمادة ، واحدة في كل مكــان وغير معدومة .

٢ ـ ان حجم (نصف قطر) الفضاء مستقل عن الزمن .

لقد ثبت صحة هاتين الفرضيتين ، طبقا لنظرية النسبية ، لكــن وفقط بعد ان اضيف الى معادلات الحقل حد افتراضي لم تكن تستلزمه النظرية بحد ذاتها ولم يكن يبدو طبيعيا من الناحية النظرية (الحد الكوني لمعادلات الحقل) .

لقد بدت لي الفرضية الثانية في ذلك الوقت امرا لا مناص منه ، لانني ظننت ان سبيل المحاكمات بدونها مسدود .

لكن الرياضي الروسي فريدمان FRIEDMAN قد برهن ، خلال العشرينات ، على ان فرضية اخرى يعقل ان توجد ، من الناحية النظرية .

فقد اثبت ان من الممكن الاحتفاظ بالفرضية الاولى دون ادخال الحد الكوني الاقل معقولية، في معادلات الحقل التثاقلي اذا رغبنا في اسقاط الفرضية الثانية . وبالتدقيق يمكن لمعادلات الحقل ان تقبل حلا يكون فيه ((نصف قطر العالم))

متعلقا بالزمن (الفضاء المتوسع) . وبهذا المعنى يمكن للمرء ان يقول مع فريدمان ان النظرية تقتضي توسع الفضاء .

وبعد سنوات قليلة اثبت (هوبل HUBBLE) ، من خلال تحريات خاصة في السدم الخارجية عن المجرات (دروب التبانة) ، ان الخيوط الطيفية الصادرة عنها منزاحة نحو الاحمر بمقدار يتناسب مباشرة مع بعد السديم عنا . ان هذه الظاهرة يمكن ان تتفسر حصرا ، في حدود معلوماتنا الحالية وبموجب مفعول دوبلر ، بحركة ابتعاد لمجموعة النجوم في الفضاء(١) ــ كما تتطلب ، في رأي فريدمان ، معادلات الحقل التثاقلي . فاكتشاف هوبل هذا يمكن ان يتخذ ، الى حد ما ، دليلا على صحة النظرية .

على ان مشكلة اخرى تبرز عندئذ . فتفسير الانزياح الطيفي للمجرات الذي اتخذه هوبل دليلا على التوسع (والذي لا يمكن بسهولة الشك فيه من الناحية النظرية) يقود بالحساب الى ان بدء العالم قد حدث منذ مليار سنة « فقط » ، بينما يشير علم الفلك الفيزيائي الى ان نمو النجوم المفردة ومجموعات النجوم قد حصل قبل ذلك بكثير . وما من وسيلة معروفة حتى اليوم تتيح الخروج من هذا التعارض .

اود اخيرا ان الفت النظر الى ان نظرية توسع الفضاء ، بالاضافة الى المعطيات الفلكية التجريبية ، لا تتيح ان نقول كلمة الفصل في خاصية الفضاء (الثلاثي الابعاد) ، منته أم لا منته ، بينما تقود الفرضية « السكونية » البدئية الى انغلاقه على نفسه (محدوديته) .



(١) ان هذه الظاهرة مؤكدة اليوم يقينا وتعرف باسم « توسع العالم الكوني » بسبب « هروب المجرات » (المترجم) .

الملحـــق ((٥))

النسبية ومسألة المكـان(١)

ان ما يميز فيزياء نيوتن انها تمنح كلا من المكان والزمان وجودا حقيقيـا بحد ذاته كما هي المادة ، لان فكرة التسارع تظهر في قانون الحركة النيوتني . لكن التسارع ، في هذه النظرية ، يشير حصرا الى « التسارع بالنسبة للفضاء » . ففضاء نيوتن يجب ان يفهم على انه « في سكون » ، او على الاقل «غير متسارع»، كي يتمكن المرء من اعتبار التسارع ، الذي يرد في قانون الحركة ، كمقـدار بكل معاني الكلمة . وكذلك الامر مع الزمن ، فهو بالطبع يدخل بالصـورة نفسها في مفهوم التسارع . وقد شعر نيوتن نفسه واكثر معاصريه النقـاد بالقلق من اضطرار المرء لالصاق حقيقة فيزيائية بالمكان نفسه كما بحالـة الحركة على حد سواء . بيد انه لم يكن للمرء في ذلك الوقت خيار آخر ، اذا رغب في ايجاد معنى واضح لعلم الميكانيك .

والواقع ان الصاق حقيقة فيزيائية بالمكان عموما كان ضرورة ملحـة وخصوصا بالمكان الخالي . واليوم ومنذ عصور قديمة يقاوم الفلاسفة هـذا الادعاء . وقد احتج ديكارت بقول من هذا القبيل : ان المكان مرادف للامتداد لكن الامتداد ملازم للاجسام ، وبذلك لا يوجد مكان بدون اجسام ولا يوجـد بالتالي مكان خال . ان نقطة الضعف في هذه الحجة تكمن اوليا فيما يلي .

---

(١) ــ كما في الترجمة الاولى لهذا الكتاب عام ١٩٢٠ ، فقد عاد صديقي القديم استـاذ الشرف س. د ملنر MILNER وافادني من خبرته الفريدة في هذا المجال ، وذلـك بقراءة ترجمة هذا الملحق وبتقديم العديد من الاقتراحات للتصحيح . كما انني ادين له وللاستاذ ا. ج. ووكر A. GWALKER استاذ الرياضيات في جامعة ليفربول ، الـذي قرأ هذا الملحق وقدم اقتراحات شتى مفيدة (المترجم الانكليزي) .

صحيح بالتأكيد ان مفهوم الامتداد ينبع من خبرتنا في انفصال الاجسام وفي تلامسها . لكننا لا نستطيع ان نستنتج من هذا ان مفهوم الامتداد لا يمكن ان يكون له ما يسوغه في الحالات التي لا تؤدي بحد ذاتها الى نشوء هذا المفهوم. ان مثل هذا التعميم للمفاهيم يمكن ان تسوغه بصورة لا مباشرة فائدته في فهم النتائج العملية . فالقول بأن الامتداد يقتصرعلى الاجسام هو بحد ذاته ادعاء لا اساس له بالتأكيد . وعلى كل حال سنرى فيما بعد ان نظرية النسبية العامة تؤكد رأي ديكارت عن طريق غير مباشر . فالذي جلبه ديكارت الى وجهة نظره الرائعة كان حتما احساسه بأن المرء غير ملزم ، لولا احكام الضرورة، بالصاق الحقيقة بشيء مثل المكان لا يمكن ان يكون له وجود « مجرب مباشرة ».

ان الاصل النفساني لفكرة المكان ، او للضرورة اليها ، بعيد عن ان يكون واضحا بالشكل الذي يظهر فيه من خلال طريقتنا المعتادة في التفكير . فعلماء الهندسة القدماء يتعاملون مع اشياء تصورية (خط مستقيم ، نقطة ، سطح) ، لا مع فضاء بحد ذاته كما صنعته الهندسة التحليلية فيما بعد . ان فكرة المكان هي على كل حال ، مستوحاة من خبرات اولية . لنفترض ان صندوقا قد صنع . ان الاشياء يمكن ان ترتب داخل الصندوق بطريقة ما ، بحيث يصبح مليئا . ان امكانية مثل هذا الترتيب هو خاصة من خواص الفرض المادي « الصندوق » ، هو شيء معطى مع الصندوق ، هو «المكان المحاط» بالصندوق. ان هذا شيء يختلف باختلاف الصناديق ، شيء مصور في الفكر بصورة طبيعية تماما ككائن مستقل عما اذا كان ام لم يكن بتاتا ، في اي وقت ، شيء في الصندوق . فاذا لم يوجد اي شيء في الصندوق فان مكانه(١) يبدو كونا « خاليا » .

في هذه الحدود يظهر مفهومنا للمكان مرتبطا بالصندوق . وينتج منه ، على كل حال ، ان امكانيات التخزين التي يوفرها الصندوق – المكان لا تتوقف

---

(١) – قد يكون من المفيد ان نذكر القارىء ، بمناسبة هذا المثال (وهذا الملحق عموما) ، ان الكلمة العربية ، مكان ، مشتقة من فعل الكون كاسم ظرفي موضعي . ف « المكان » هو في الاصل المجرد « ظرف الكون » الموضعي (المترجم) .

على ثخن جدران الصندوق . الا يمكن لهذا الثخن ان ينعدم دون ان نخسر مفهوم « المكان » من جراء ذلك ؟ ان هذا التصور الحدي عملية مشروعة طبعا ، وعندئذ سيبقى المكان في الذهن دون الصندوق ، كشيء واضح بنفسه ، بالرغم من انه يفقد حقيقته اذا نسينا اصل مفهومه . ويمكن للمرء ان يتفهم اشمئزاز ديكارت من اعتبار المكان شيئا مستقلا عن الاغراض المادية ، شيئا يمكن ان يوجد دون المادة(١) . (لكن هذا لم يمنعه ، في الوقت نفسه ، من ان يعامل الفضاء كمفهوم اساسي في هندسته التحليلية) . هذا وان تركيز الانتباه على الخلاء في ميزان الضغط الزئبقي من شأنه ان يفحم آخر الديكارتيين . ولكن يجب ان لا ننكر ، حتى في هذه المرحلة الابتدائية ، ان شيئا غير مرض ما يزال يشوب مفهوم المكان ، او المكان المعتبر شيئا مستقلا حقيقيا .

ان الاساليب التي يمكن بها صر الاجسام في المكان (في الصندوق مثلا) هي هدف الهندسة الاقليدية في الابعاد الثلاثة وذات البنية المسلماتية التي خدعتنا في نسيان انها تختص في امور قابلة للتحقيق .

والآن اذا استخرجنا مفهوم المكان بالاسلوب المعروض اعلاه والذي ينبع من الخبرة في « املاء » الصندوق ، فان هذا المكان هو قبل كل شيء فضاء محدود . وهذه المحدودية لا تبدو ، على كل حال ، اساسية لاننا يمكن دوما ان نفكر بصندوق اكبر كي يحتوي الصندوق الاصغر . وبهذه الوسيلة يبدو المكان شيئا لا محدود .

انني لن أتعرض هنا للكيفية التي يمكن بها ان نتقصى مفاهيم الابعاد الثلاثة والسمة الاقليدية للمكان . لكنني سأهتم ، بالاحرى وقبل كل شيء ومن وجهات نظر اخرى ، بالدور الذي لعبه مفهوم المكان في تطور الفكر الفيزيائي .

---

(١) ـ ان محاولة كانت KANT للخروج من هذا المأزق بانكار موضوعية المكان يصعب حتما ان نركن اليه ، لان امكانيات صر متلاصقة داخل فضاء الصندوق امور فيها من الموضوعية ما في الصندوق نفسه وما في الاغراض المصرورة ضمنه .

عندما يوضع صندوق صغير s ، ساكن نسبيا ، ضمن المكـان الجوفي لصندوق كبير S . فان المكان الجوفي لـ (s) هو جزء من المكان الجوفي لـ (S) ، كما ان « المكان » نفسه الذي يحوي كليهما ينتمي الى كل منهما . وعندما يكون s متحركا بالنسبة لـ S فان مفهوم المكان يصبح اقـل بساطة . اذ ينزع المرء عندئذ الى التفكير بأن s لايستوعب دوما نفس المكان، ولكن جزءا متغيرا من مكان S . يصبح من الضروري ، والحالة هذه ، ان نوزع على كل صندوق مكانه الخاص ، لا على اعتبار انه محدود ، وان نعتبر هذين المكانين في حالة حركة ، واحدا بالنسبة للآخر .

قبل ان ينتبه المرء لهذا التعقيد ، كان المكان يبدو حيزا لا محدودا ، او حاويا تتجول فيه الاغراض المادية . لكن علينا الآن ان لا ننسى انه يوجد عدد لا متناه من الامكنة التي تتحرك بعضا بالنسبة لبعض . فمفهوم المكان ، ككائن موجود موضوعيا ومستقل عن الاشياء ، ينتمي الى الفكر قبل ــ العلمي ، لكن الامر ليس كذلك بخصوص فكرة وجود عدد لا متناه من الامكنة المتحركـة بعضا بالنسبة لبعض . فالفكرة الثانية حتم منطقي بالفعل ، لكنها بعيدة عن ان تلعب دورا كبيرا في الفكر العلمي .

ولكن ماذا يمكن ان نقول بخصوص الاصل النفساني لمفهوم الزمـن ؟ ان هذا المفهوم مرتبط دون شك بواقع « عملية الاستذكار » ، وكذلك بالتفريق بين المعاناة المحسوسة وبين تذكرها . ومن المشكوك فيه ان يكون هذا التفريق بين المعاناة المحسوسة (او مجرد اعادة تمثيلها) وبين تذكرها ، بحد ذاتـه موهبة نفسانية مباشرة . فكل امرىء قد تعرض لان يشك فيما اذا كـان شيء قد وقع له بالفعل ام انه كان مجرد حلم . ومن المحتمل ان تكون القدرة على التمييز بين هذين الاختيارين تأتي اولا كنتيجة لنشاط ذهني مـرتب مبـدع .

ان الخبرة مرتبطة بـ « الاستذكار » ، وهي تعتبر شيئا « أبكـر » زمنيا من « المعاناة الراهنة » . وهذا مبدأ ترتيبي ادراكي في مجال الخبرات المستذكرة .

وان حصول الانسجام معه يولد المفهوم الذاتي للزمن ، اي مفهوم الزمن بالاعتماد على ترتيب الاحداث التي يعانيها الفرد .

فماذا نعني بجعل مفهوم الزمن موضوعيا . لنفحص مثالا . انسان A (انا) يعاني التجربة « انبثق النور » . وفي الوقت نفسه يختبر A ايضا سلوكا للانسان B من خلال العلاقة بين خبرته الخاصة « انبثق النور » وسلوك B . وبذلك يحدث ان A يربط مع B التجربة « انبثق النور » . ففي ذهن A تتولد فكرة اناسا آخرين يساهمون ايضا في التجربة « انبثق النور » . فتجربة « انبثق النور » لم تعد تتفسر حصرا كتجربة شخصية ، بل كتجربة مع اناس آخرين (او ، عند الاقتضاء فقط ، « خبرة كامنة ») . وعن هذا الطريق يتولد التفسير بأن « انبثق النور » التي دخلت في الوعي ، بادىء الامر ، ك « تجربة ــ معاناة » ، تتفسر الآن ايضا ك « حادث » (موضوعي) . فالمجموع الاجمالي لكل الحوادث هو بالضبط ما نعنيه عندما نتكلم عن « العالم الحقيقي الخارجي » .

لقد رأينا اننا نشعر بأنفسنا مدعوين الى تدمير الترتيب الزمني لتجاربنا وفق الاساس التالي . اذا كان ج متأخرا عن ب وكان هـ متأخرا عن ج ، فان هـ يكون متأخرا ايضا عن ب (تسلسل التجارب) . والآن ما هو ، في هذا التسلسل ، موضع « الحوادث » التي ربطناها بالتجارب ؟ فللوهلة الاولى يبدو بديهيا ان نعتبر ان الترتيب الزمني للحوادث موجود وهو يتفق مع الترتيب الزمني للتجارب . ذلك هو الوضع الذي كان قائما ، عموما وبدون شعور ، حتى بدأت الشكوك فيه تطل برأسها(١) . ولكي نتوصل الى فكرة عالم موضوعي ما نزال بحاجة الى مفهوم بناء اضافي . فالحادث لا يقع فقط في الزمان بل وفي المكان ايضا .

لقد حاولنا حتى الآن ان نشرح كيف يمكن نفسانيا استخراج مفاهيم

---

(١) ــ ان ترتيب الحوادث الزمني المحصول عليه ، مثلا ، بوسائل صوتية يمكن ان يختلف عنا لترتيب الزمني المحصول عليه بالرؤية ، وبذلك لا يمكن ان نعتبر ببساطة التسلسل الزمني للحوادث منطبقا على التسلسل الزمني للتجارب .

المكان والزمان والحادث من خلال علاقتها بالتجارب . انها ، بالمنطق ، مخلوقات حرة للادراك البشري ، انها وسائل التفكير ، وهي تخدم اهدافنا في ربط تجاربنا بعضا ببعض ، بحيث تصبح وسيلة في دراسة هذه التجارب . وان محاولتنا في ان نصبح واعين للمصادر العملية لهذه المفاهيم الاساسية يجب ان تكشف لنا مدى المحدودية الفعلية لهذه المفاهيم . وبذلك نصبح على معرفة بحريتنا ، وهي حرية يصعب دوما ، عند الاقتضاء ، وضعها موضع التنفيذ المحسوس .

ما نزال بحاجة الى اضافة شيء جوهري الى هذا المخطط يتعلق بالاصل النفساني للمفاهيم ، مكان — زمان — حادث (التي نسميها بايجاز « شبه — المكان » لتمييزها عن المفاهيم النابعة من المجال النفساني) . فقد استخرجنا مفهوم المكان من التجارب التي تستخدم الصناديق وترتيب الاغراض المادية فيها . ان هذه الطريقة في تشكيل المفاهيم تفترض سلفا مفهوم الاغراض المادية (« الصندوق » مثلا) .

وبهذه الطريقة ذاتها يلعب الاشخاص ، الذين يجب ادخالهم لتشكيل المفهوم الموضوعي للزمن ، دور الاغراض المادية في هذا الشأن . وبذلك يبدو لي ان تشكيل مفهوم الغرض المادي يجب ان يسبق مفهومينا عن الزمان والمكان .

ان كل مفاهيم شبه — المكان هذه تنتمي الى الفكر قبل العلمي مع مفاهيم مثل الحزن والرغبة والامل ... الخ . ذات المنشأ النفساني . ومما يميز الآن الفكر في الفيزياء ، كالفكر في كل العلوم التجريبية عموما ، هو انه يسعى مبدئيا الى التعامل مع مفاهيم شبه — مكان وحيدة ، ويجتهد في ان يعبر بواسطتها عن كل علاقة تتخذ شكل قانون . والفيزيائي يبحث في ارجاع الالوان والاصوات الى اهتزازات ، والقلق الفيزيولوجي والالم الى سيالة عصبية ، وذلك بحيث يختفي العنصر المادي من الآلية السببية للوجود ، ولا يظهر في اي مكان كحلقة مستقلة في التسلسل السببي . ولا شك في ان هذا الموقف ، الذي يقول بأن فهم كل العلاقات يتم من خلال استعمال مفاهيم شبه — المكان فقط كامكانية مبدئية ، هو المدلول المفهوم في الوقت الحاضر لكلمة « مادية » (لان « المادة » قد فقدت دورها كمفهوم اساسي) .

ولكن ما ضرورة ان نستمد من المجال الافلاطوني المثل الفكرية الاساسية للعلم التجريبي ، وان نحاول ان نكشف امتدادها الواقعي ؟ الجواب : لكـي نحرر هذه المثل من الحظر المفروض عليها ، وبذلك نكون قد قمنـا بانجـاز تحريري عظيم في تشكيل المثل والمفاهيم . ونحن ندين بذلك للاعمال الخالدة التي قدمها هيوم D. HUME وماخ E. MACH اللذين كانا اول من عالج هذه الافكار الحرجة .

لقد استمد العلم من الافكار قبل العلمية مفاهيم المكان والزمان والجسم المادي (مع الحالة الخاصة الهامة : « الجسم الصلب ») ثم حورها وجعلهـا اكثر دقة . فكان اول انجاز ناجح له يتمثل في تطوير هندسة اقليدس ، التي يجب ان لا تحجب صياغتها المسلماتية عن اعيننا اصلها العملي (امكانية رصف او تنضيد اجسـام صلبة) . ونذكر خصوصا ان السمة الاقليدية والابعـاد المكانية الثلاثة ناجمة كلها عن اعتبارات عملية . (يمكن للمكان ان يملأ بمكعبات مصنوعـة) .

ان حراجة مفهوم المكان قد تجلت لدى اكتشافي انه لا يوجد اجســام تتمتع بصلابة تامة . فكل الاجسام ذات مرونة معينة كما انها يتغير حجمهـا بتغير درجة حرارتها . فالتشكيلات البنائية ، التي علينا ان نصف أمكانيــات تآلفها بواسطة الهندسة الاقليدية ، لا يمكن اذن ان تتمثل بمعزل عن المفاهيـم الفيزيائية . لكن الفيزيناء لا بد لها رغم كل شيء من ان تستخدم الهندسة في توطيد مفاهيمها ، وبهذه الصورة لا يمكن التعبير عن المحتوى العملي للهندسة، كما لا يمكن وضعه على محك التجربة ، الا في مجال الفيزياء بتمامها .

وبهذه المناسبة يجب ايضا ان لا ننسى علم الذرة ولا مفهومه في محدودية تجزئـة الذرة . لان المسافات في هذا السلم المجهري لا يمكن قياسها . كما ان علم الذرة يجبرنا على ان نهجر ، مبدئيا ، فكرة وجود سطوح محددة حـادة وسكونية للاجسام الصلبة . وبتعبير ادق ، لا يوجد قوانين **محكمة** ، حتى في المجال المجهري ، تنظم رصف وتنضيد اجسام صلبة متلامسة فيما بينها .

ورغم هذا ، لم يفكر احد في هجر مفهوم المكان لانه كان يبدو ضروريـا في جميع منظومات العلوم التجريبية المرضية جدا . وقد كان ماخ ، في القرن التاسع عشر ، الانسان الوحيد الذي فكر جديا باسقاط مفهوم المكان . ولاجل ذلك حاول ابداله بمفهوم مجمل المسافات الآنية بين كل النقاط المادية . (لقد قام بهذه المحاولة كي يتوصل الى فهم مرض للعطالة) .

الحقـــل :

ان المكان والزمان يلعبان في ميكانيك نيوتن دورا مثنويا . فهما ، اولا ، يلعبان دور حامل او اطار للاشياء التي تحدث في الفيزياء ، فنسند اليهمـا الحوادث الموصوفة في الاحداثيات المكانية والزمن ، وتعتبر المادة ، مبدئيا ، مؤلفة من « نقاط مادية » تولد بحركتها الحدث الفيزيائي . فعندما نتخـذ المادة كائنا مستمرا ، انما نفعل ذلك مؤقتا في الاحوال التي لا نريد فيها ، او لا نستطيع ، توصيف البنية المتقطعة . فالاجزاء المادية الصغيرة (عناصر الحجم) تعامل ، في هذه الحال ، معاملة النقطة المادية ، على الاقل عندما لا نهتـم الا بالحركة دون ان نعبأ بما قد يقع لها مما لا يمكن ان يخل بالحركة ولا يفيد في دراستها (كالتغيرات الحرارية او الكيميائية) . اما الدور الثاني الذي يلعبه المكان والزمان فقد كان دور « جملة عطالية » . فمن بين كل جمل المقارنة التي يمكن ان نتصورها كانت الجمل العطالية تتمتع بمزية ان قانون العطالة صحيح فيهـــا .

والامر الجوهري في هذا هو ان « الحقيقة الفيزيائية » ، عندما نعتبرها موضوعا مستقلا عن الاغراض الماثلة فيها ، كانت تفهم مؤلفة ، مبدئيا على الاقل، من مكان وزمان اولا ومن نقاط مادية موجودة بصورة دائمة ومتحركة في المكان والزمان ثانيا . هذا وان الوجود المستقل للمكان والزمان يمكن ان تصـاغ بالمقولة الحادة التالية : اذا اختفت المادة فسيبقى المكان والزمان وحدهمـا دونها (كنوع من مسرح للوقائع الفيزيائية) .

ان تجاوز هذا الموقف قد تم من خلال تطور بدا ، في اول الامر ، عديم العلاقة بمسألة المكان ـ الزمان ، ونعني به ظهور **مفهوم الحقل** وهدفه الصريح

في الحلول ، مبدئيا ، محل فكرة الجسيم (النقطة المادية) . ففي اطار الفيزياء التقليدية كان مفهوم الحقل يبدو مفهوما مساعدا في حالة التعامل مع المـــادة وكأنها متصل . فلدى التعامل مثلا من الانتقال الحراري في الجسم الصلب كانت حالة الجسم الصلب تتعين بمعرفة درجة الحرارة في كل نقطة من الجسم الصلب وفي كل زمن . وهذا يعني ، رياضيا ، ان درجة الحرارة T تتمثل بصيغة رياضية (بتابع)للاحداثيات المكانية وللزمن t (حقل درجة الحرارة). ان قانون انتقال الحرارة يتمثل بعلاقة موضعية (بمعادلة تفاضلية) تحوي كل الحالات الخاصة لانتقال الحرارة . ودرجة الحرارة ليست هنا سوى نموذج لمفهوم الحقل . انها مقدار (او مجموعة مقادير) تابع للاحداثيـات وللزمن . وكنموذج آخر نسوق عملية توصيف حركة سائل . ففي كل نقطة من حجم السائل يوجد ، في كل زمن ، سرعة تتعين كميا بواسطة ثلاث «مركبات» على محاور جملة احداثيات (بشعاع) . فمركبات السرعة في نقطة (حقـل مركبات) هي ، هنا ايضا ، توابع للاحداثيات x, y, z وللزمن (t) .

ان الحقلين المذكورين يتمتعان بخاصية انهما يتولدان ضمن كتلة وازنة ، فهما يفيدان فقط في توصيف حالة لهذه المادة . وطبقا للتطور التاريخي لمفهوم الحقل لا يمكن ان يوجد حقل حيث لا يوجد مادة . بيد انه قد ثبت ، في الربع الاول من القرن التاسع عشر ، ان ظاهرتي التداخل وانتشار الضوء يمكن ان تتفسرا بوضوح مدهش عندما نعتبر الضوء حقل ــ موجة يشبه تماما حقـل الاهتزازة الميكانيكية في جسم صلب مرن . وبذلك تولد شعور بضرورة ادخال حقل يمكن ان يوجد في « المكان الخالي » دون وجود مادة وازنة .

لقد نشأ من هذه الشئون وضع غريب لان مفهوم الحقل ، انطلاقا من منشئه ، يتجلى مقتصرا على توصيف الحالات ضمن جسم وازن . وهذا يبدو امرا لا يمكن الشك فيه ، خصوصا وان هناك قناعة ان كل حقل يجب ان ينظر اليه كحالة تقبل تفسيرا ميكانيكيا ، مما يفترض وجود مادة سلفا . والان يشعر المرء بأنه مدعو الى تصور وجود ضرب من المادة ، حتى في ما كان يعتبر خلاء ، اطلق عليها اسم « الاثير » .

ان تخليص مفهوم الحقل من افتراض تعلقه بحامل ميكانيكي قد احتل مكانا بارزا بين القضايا ذات الاهمية النفسانية العظمى في خط تطور الفكر الفيزيائي . ففي النصف الثاني من القرن التاسع عشر ومن خلال اعمال فارادي ومكسويل تبين بوضوح متزايد ان توصيف الوقائع الكهرطيسية بلغة الحقل يفوق عاليا عملية توصيفها بالاعتماد على المفاهيم الميكانيكية للنقاط المادية . فمن جراء ادخال مفهوم الحقل في هذا العلم نجح مكسويل في التنبؤ بوجود امواج كهرطيسية لا يمكن ان يشك بالتطابق الاصيل بينها وبين الامواج الضوئية ، بسبب تساوي سرعتي انتشارها . وكنتيجة لذلك ابتلعت الكهرطيسية مبدئيا علم الضوء . واحد الآثار النفسانية لهذا النجاح العظيم كان ان اكتسب مفهوم الحقل ، في مواجهة النظرة الميكانيكية للفيزياء القديمة ، استقلالا اكبر .

ومع ذلك فقد اعطي للحقول الكهرطيسية ، في بادىء الامر ، تفسير يعتمد على انها حالات من الاثير ، واعتبرت بحماس حالات ميكانيكية ، لكن الاخفاق المستمر في متابعة هذا الطريق جعل العلم يعتاد تدريجيا على فكرة نبذ مثل هذه الصورة الميكانيكية . على ان القناعة بأن الحقول الكهرطيسية يجب ان تمثل حالات من الاثير ظلت قائمة ، وعلى تلك الحال استمر الوضع حتى منعطف القرن .

لقد جلبت نظرية الاثير معها السؤال التالي : كيف يتصرف الاثير ، من وجهة النظر الميكانيكية ، ازاء الاجسام الصلبة ؟ هل يساهم في حركتها ام ان اجزاءه تظل في حالة سكون بعضا بالنسبة لبعض ؟ لقد بنيت عدة تجارب رائعة في سبيل الاجابة عن هذا السؤال . وبهذه المناسبة يجب ذكر الوقائع الهامة التالية : « زيغ » النجوم الثابتة نتيجة الحركة السنوية للكرة الارضية ، و « مفعول دوبلر » ، وهو تأثير الحركة النسبية للنجوم الثابتة على تواتر الاهتزازة الضوئية الواردة منها على الارض ، من اجل تواترات اصدار معلومة . لقد فسر لورنتس نتائج هذه الوقائع والتجارب كلها ، ما عدا تجربة مايكلسون — مورلي ، بافتراض ان الاثير لا يشارك في حركات الاجسام الوازنة وان اجزاءه

لا تتحرك بعضا بالنسبة لبعض . وبذلك بدا الاثير ، كما كان ، تجسيدا لمكان ساكن اطلاقا . لكن ابحاث لورنتس قد كشفت شيئا آخر . لقد فسرت كل الوقائع الكهرطيسية والضوئية في الاجسام الوازنة المعروفة في ذلك الوقت ، بافتراض ان تأثير المادة الوازنة على الحقل الكهربائي — وبالعكس — ناجم حصرا عن واقع ان الجسيمات المكونة للمادة تحمل شحنات كهربائية تصاحب الجسيمات في حركتها . اما بخصوص تجربة مايكلسون — مورلي فقد برهن لورنتس على ان نتيجتها لا تتعارض على الاقل ، مع نظرية اثير ساكن .

ويرغم كل هذه النجاحات الجميلة ظلت نظرية الاثير في وضع غير مريح تماما ، وذلك للاسباب التالية . فالميكانيك التقليدي ، الذي يتماسك مع هذه النظرية تماسكا اكيدا ووثيقا ، يقول بتكافؤ كل الجمل العطالية ، او « الامكنة » العطالية ، لدى صياغة قوانين الطبيعة ، اي بعدم تغير شكل هذه القوانين لدى الانتقال من جملة عطالية الى اخرى عطالية . كما ان **التجارب** الكهرطيسية والضوئية تخضع لهذه المقولة بدقة عظيمة . لكن اساس **النظرية** الكهرطيسية يقول بوجوب اعطاء افضلية خاصة لجملة عطالية معينة هي ، بالتحديد ، جملة الاثير الضوئي الساكن . ان صورة هذا الاساس النظري كانت اقل بكثير من مرضية . الا يوجد تعديل يحتفظ ، كما في الميكانيك التقليدي ، بتكافؤ الجمل العطالية (نظرية النسبية الخاصة ؟) .

ان الجواب عن هذا التساؤل هو نظرية النسبية الخاصة . انها تستمد من نظرية مكسويل — لورنتس فرضية ثبات سرعة الضوء في الخلاء . ولكي نحقق انسجاما مع تكافؤ الجمل العطالية (مبدأ النسبية الخاصة) يجب أن نهجر الاعتقاد بالتزامن المطلق ، وذلك يستتبع ايضا ظهور تحويل لورنتس ، للزمن وللاحداثيات المكانية ، لدى المرور من جملة عطالية لاخرى عطالية . فكل ما تحويه نظرية النسبية الخاصة موجود في المقولة التالية : ان قوانين الطبيعة لا يتغير شكلها ازاء تطبيق تحويل لورنتس عليها . والشيء المهم في هذا المطلب يكمن في واقع انه يحد القوانين الطبيعية الممكنة بشكل معين .

والآن ما هو موقف نظرية النسبية الخاصة من مسألة المكان ؟ يجب قبل

كل شيء ، ان نحذر من الراي القائل بأن فكرة الابعاد الاربعة للواقع الحقيقي هي فكرة جديدة ادخلت للمرة الاولى مع هذه النظرية . ففي الفيزياء التقليدية نفسها كان الحادث يتحدد بأربعة اعداد : ثلاثة احداثيات مكانية واحداثي واحد زمني ، فمجمل « الاحداث » الفيزيائية يعتبر موجودا في متصل رباعي الابعاد . بيد ان الاعتماد على الميكانيك التقليدي يؤدي الى تقطيع هذا المتصل الرباعي ، موضوعيا ، الى متصلين منفصلين : زمان وحيد البعد ومكان ثلاثي الابعاد ، وهذا المكان وحده يحوي الحوادث المتزامنة . وهذا الانفصال قائم في جميع الجمل العطالية . وهذا ما نعنيه بالقول ان الزمن مطلق في الميكانيك التقليدي. اما في نظرية النسبية الخاصة فالامر مختلف . ان مجموعة الحوادث المتزامنة مع حادث منتخب موجودة ، حقا في جملة عطالية معينة ، ولكن ليس بصورة مستقلة عن اختيار الجملة العطالية والمتصل الرباعي الابعاد لم يعد قابلا للانقسام الى مقطعين يحويان كلاهما حوادث متزامنة ، وكلمة « الآن » تفقد في امتداد العالم المكاني معناها الموضوعي . ذلك هو السبب الذي من اجله يجب اعتبار الزمان والمكان متصلا واحدا ذا اربعة ابعاد غير قابل للانقسام موضوعيا اذا اردنا ان نعبر عن محتوى العلاقات الموضوعية دون اللجوء الى عملية اصطلاح اعتباطية غير ضرورية .

بما ان نظرية النسبية الخاصة قد كشفت عن التكافؤ فيما بين جميع الجمل العطالية . فهي بذلك تثبت عدم امكانية التمسك بفرضية الاثير الساكن . وعندها يصبح من الضروري ان نتخلى عن فكرة ان الحقل الكهرطيسي حالة من حالات حامل مادي . وهو بذلك يصبح عنصرا من عناصر التوصيف الفيزيائي قائما بذاته كما يقوم مفهوم المادة بذاته في نظرية نيوتن .

لقد ركزنا اهتمامنا حتى الآن على كيفية **التعديل** الذي ادخلته نظرية النسبية الخاصة على مفهومي المكان والزمان . لنركز الآن انتباهنا على الامور التي استمدتها نظرية النسبية من الميكانيك القديم . ففيها ايضا تبقى قوانين الطبيعة صالحة فقط عندما تتخذ الجملة العطالية اساسا في توصيف المكان ـ الزمان . فمبدأ العطالة ومبدأ ثبات سرعة النور صحيحان في **الجمل العطالية** فقط .

كما ان قوانين الحقل لا يمكن ان يكون لها معنى ولا صحة الا في الجمل العطالية. فالمكان ، هنا ايضا وكما في الميكانيك التقليدي ، عنصر مستقل في تمثيل الحقيقة الفيزيائية . فلو تخيلنا ان المادة والحقل قد اختفيا ، فان المكان العطالي او ، بتدقيق اكبر ، هذا المكان مع الزمان المرتبط به يبقيان بعدهما . هذا وان البناء الرباعي الابعاد (فضاء منكوفسكي) هو الذي يعتبر الحامل للمادة والحقل . فالامكنة المرتبطة بها ، هي وحدها الجمل الاحداثية الرباعية الابعاد المتميزة بأن المرور من احداها لاخرى يتم بتحويلات لورنتس الخطية . ولما كان لم يعد يوجد في هذا البناء الرباعي الابعاد اي مقتطع يمثل « الآن » موضوعيا ، فان مفاهيم الحدوث والصيرورة اصبحت معطلة تماما وبقيت على تعقيدها . وبذلك يبدو طبيعيا اكثر ان نفكر بالحقيقة الفيزيائية على اساس انها ذات وجود رباعي الابعاد وليست ، كما كانت ، تطورا في وجود ثلاثي الابعاد .

ان هذا المكان الرباعي الابعاد المتماسك ، في نظرية النسبية ، يشابه في بعض وجوهه اثير لورنتس الثلاثي الابعاد المتصلب . ففي نظرية لورنتس تبقى المقولة التالية صحيحة : ان توصيف الحالات الفيزيائية يفترض مكانا موجودا سلفا وذا وجود مستقل . وهكذا نرى انه ، حتى هذه النظرية لم تتحرر من العيوب الديكارتية المتمثلة بوجود مستقل ، او قبلي ، لـ « المكان الخالي » . وهدفنا الحقيقي من هذه المناقشة الاولية التي نوردها هنا ، هو ان نكشف الى اي مدى امكن تجاوز هذه الشكوك في نظرية النسبية العامة .

مفهوم المكان في نظرية النسبية العامة :

لقد نشأت هذه النظرية ، في البدء ، من محاولة فهم سبب التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . ننطلق من جملة عطالية S1 فضاؤها ، من وجهة النظر الفيزيائية ، خال . او ، بتعبير آخر ، لا يوجد في الحيز المكاني الذي هي فيه مادة (بالمعنى المعتاد) ولا حقل (بالمعنى المعروف في نظرية النسبية الخاصة) . لنفترض الآن انه يوجد جملة مقارنة ثانية S2 ذات تسارع منتظم بالنسبة لـ S1 . S2 ليست اذن جملة عطالية . وكل كتلة اختبار في S2 تكون ذات حركة متسارعة لا تتعلق بحالتها الفيزيائية او الكيميائية .

فبالنسبة لـ S_2 يوجد اذن حالة لا يمكن تمييزها ، لاول وهلة على الاقل ، عن وجود حقل تثاقلي . فالمفهوم التالي ينسجم اذن مع الوقائع الملحوظة : ان S2 يكافيء ايضا « جملة عطالية » ، ولكن يوجد بالنسبة لـ S2 حقل (متجانس) تثاقلي (لا يهتم المرء بأصله) . وهكذا ، عندما يسود حقل تثاقلي في جملة المقارنة المدروسة فان الجملة العطالية تفقد معناها الموضوعي، على اعتبار ان « مبدأ التكافؤ » هذا يمكن ان يتعمم على اية حركةمهما كانت جمل المقارنة . فاذا امكن ان نبني نظرية متماسكة على هذه الافكار الاساسية فان هذه النظرية ستستجيب من تلقاء ذاتها لواقع تساوي الكتلتين ، العطالية والثقالية ، المؤكد عمليا .

ان التحويل اللاخطي للاحداثيات الاربعة ، عندما يعالج في متصل رباعي ، يعبر عن المرور من S1 الى S2 . وهنا يبرز سؤال : ما هو شكل التحويلات اللاخطية المسموح بها ، او ، كيف يمكن تعميم تحويل لورنتس ؟ وللجواب عن هذا السؤال نسوق الاعتبارات الحاسمة التالية .

يمكن ان نعزو للجملة العطالية في النظرية الاسبق الخاصة التالية : ان الفروق في الاحداثيات تقاس بـ « قضبان » قياس مستقرة ، والفروق الزمنية بميقاتيات ساكنة . ان الافتراض الاول مدعوم بافتراض آخر هو ان النظريات حول « الاطوال » في الهندسة الاقليدية تنطبق على قضبان القياس الساكنة الموصوفة بالتوالي . وبمحاكمات بسيطة نستنتج من نظرية النسبية الخاصة ان هذا المدلول الفيزيائي للاحداثيات مفقود في جمل مقارنة (S_2) متسارعة بالنسبة لجملة عطالية (S_1) . فاذا كان الحال كذلك فان الاحداثيات تعبر عندئذ حصرا عن مدى او عن رتبة « التماس » وبالتالي ايضا عن الدرجة البعدية للمكان ، لكنها لا تعبر عن اي من خواصه المترية . وبذلك نصبح مضطرين الى تعميم التحويلات على شكل تحويلات مستمرة اختيارية (١) . وهذا يتضمن مبدأ النسبية العامة : ان قوانين الطبيعة يجب ان تتوافق في التحويلات المستمرة الاختيارية للاحداثيات . وهذا الوجوب (بالاضافة الى

---

(١) — ان هذا الاسلوب في التعبير ليس صحيحا بالضبط ولكنه ربما يكفي هنا .

وجوب كون القوانين ذات بساطة ومنطقية عظميين) يضع للقوانين الطبيعية المستهدفة حدودا اضيق بكثير من الحدود التي يفرضها مبـدا النسبيـة الخاصـة .

ان تسلسل الافكار يستند جوهريا على الحقل كمفهوم مستقل . لان الظروف السائدة في S_2. تتفسر كحقل تثاقلي دون ان نثير مسألة وجود الكتل التي تولد الحقل . وبفضل تسلسل الافكار هذا نستطيع ان نفهـم لماذا كانت قوانين الحقل التثاقلي المحض مرتبطة بنظرية النسبية العامـة اكثر من ارتباط الحقول الاخرى بها (كأن يكون ثمة حقل كهرطيسي مثلا) . وهذا يعني تماما اننا نملك اساسا جيدا لافتراض ان فضاء منكوفسكي « العديم الحقل » يمثل حالة خاصة ممكنة من القانون الطبيعي ، هي ، في الواقع اكثر الحالات الخاصة التي يمكن ان نتصورها ببساطة . ان الخواص المترية لمثـل هذا المكان تتميز بواقع ان المجموع $dx_1{}^2+dx_2{}^2+dx_3{}^2$ هو مربـع الفاصل المكاني ، مقاسا بواحدة عيارية ، بين نقطتين لا متناهيتين في التجـاور من مقتطع « شبه مكان » ثلاثي الابعاد (علاقة فيثاغرس) ، بينما dx_4 هو الفاصل الزماني ، مقاسا بمعيار زمني مناسب ، بين حادثين يشتركـان في (x_1, x_2, x_3) . وهذا يعني ببساطة ان معنى موضوعيا متريا معـلق بالمقدار :

$$ds^2=dx_1{}^2+dx_2{}^2+dx_3{}^2-dx_4 \qquad (١)$$

كما ثبت لنا ، منذ قليل ، من خلال تحويلات لورنتس . وهذا الواقـع يتعلق رياضيا بشرط كون ds^2 لا متغيرا ازاء تحويلات لورنتس .

والآن ، اذا اخضعنا هذا المكان (المعادلة (١)) ، في عرف مبدأ النسبيـة العام ، الى تحويل احداثي مستمر اختياري ، نعبر عندئذ عن المعنى الموضوعي لـ ds في جملة احداثيات جديدة بالعلاقة :

$$ds^2=g_{ik}dx_i dx_k \qquad (١ ب)$$

حيث تجري عملية جمع على القرينتين K , i من اجل كل التراكيب 11 , 12 حتى 44 . فالامثال g_{ik} ليست الآن ثابتة ولكنها توابع للاحداثيات تتعين بالتحويل المنتخب اختياريا . على ان هذه الامثال g_{ik} ليست توابع اختيارية للاحداثيات الجديدة ولكنها فقط توابع من نوع يتميز بأن الصيغة (١ ب) يمكن ان تتحول عائدة الى الصيغة (١) بواسطة تحويل مستمر للاحداثيات الاربعة . ولكي يكون هذا ممكنا يجب على g_{ik} ان تحقق مجموعة معادلات شرطية في توافق التحويل ، كان ريمان قد حصل عليها قبل نصف قرن من صياغة نظرية النسبية العامة (شرط ريمان) . وطبقا لمبدأ التكافؤ فان (١ ب) تعبر ، بشكل موافق التغير ، عن حقل تثاقلي من نوع خاص ، وذلك عندما تستجيب التوابع g_{ik} لشرط ريمان .

ينتج من ذلك ان القانون المطلوب من اجل الحقل التثاقلي المحض من النوع العام يجب ان يتحقق عندما يتحقق شرط ريمان ، لكنه يجب ان يكون اضعف او اضيق مدى من شرط ريمان . وبهذه الطريقة يتعين عمليا قانون الحقل في التثاقل المحض ، وهي نتيجة لن نبررها بتفصيل اوسع هنا .

نحن الآن في وضع يمكننا ان نستشف منه الى اي مدى صورت نظرية النسبية العامة في مفهوم المكان . فللمكان (المكان ـ الزمان) ، بموجب الميكانيك التقليدي ونظرية النسبية العامة ، وجود مستقل عن المادة وعن الحقل . فلكي نستطيع ان نصف بالتمام كل ما يملأ المكان مما هو مستقل عن الاحداثيات ، فان المكان ـ الزمان ، او الجملة العطالية بخواصها المترية ، يجب ان يعتبر دفعة واحدة شيئا موجودا ، والا فقد توصيف « ما يملأ المكان » معناه (١) . والمكان ، في نظرية النسبية العامة من جهة اخرى وكشيء يحل محل « ما يملأ المكان » ، ليس له وجود منفصل . وبذلك يمكن للحقل التثاقلي المحض ان يتعين بخواص g_{ik} (كتوابع للاحداثيات) ، اي بحل معادلات التثاقل . فاذا تصورنا ان الحقل التثاقلي ، اي التوابع g_{ik} ، قد زال ، فلن يبقى مكان

(١) ـ اذا اعتبرنا ان ما يملأ المكان (الحقل مثلا) قد زال ، فسيبقى المكان المتري وفق العلاقة (١) التي يجب ان تحدد ايضا السلوك البدئي لجسم الاختبار المستخدم هنا .

من النوع(١) ، بل لن يبقى شيء على الاطلاق ، حتى ولا « فضاء توبولوجي»(١). لان التوابع g_{ik} لا تصف الحقل فحسب بل وتصف ايضا في الوقت نفسه الخواص التوبولوجية والبنية المترية لمتعدد الابعاد . فالفضاء الذي من النوع (١) ، ليس ، من وجهة نظر النسبية العامة ، فضاء دون حقل ، بل هو حالة خاصة من الحقل g_{ik} ، حالة لا يكون فيها — في جملة المقارنة المستخدمة التي ليس لها بحد ذاتها معنى موضوعي — للتوابع g_{ik} قيم مستقلة عن الاحداثيات . ولا يوجد من هذا القبيل شيء ويمكن ان يعتبر مكانا خاليا ، اي مكانا بدون حقل .

فالمكان — الزمان ليس موجودا بنفسه ، بل كخاصة بنيوية للحقل .

وعلى أساس هذا كله ، لم يكن ديكارت بعيدا جدا عن الحقيقة عندما اعتقد بوجوب استبعاد وجود مكان خال . فالفكرة فعلا تبدو محالا ، طالما كانت الحقيقة الفيزيائية لا ترى الا من خلال الاجسام الوازنة . فهي تتطلب فكرة الحقل كممثل للحقيقة ، بالاشتراك مع مبدأ النسبية العامة ، كي تظهر البذرة الحقيقية لفكرة ديكارت ، يوجد مكان « خال من الحقل » .

تعميم نظرية التثاقل :

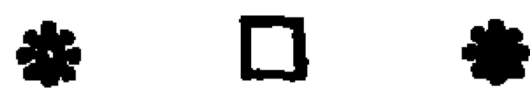
ان نظرية الحقل التثاقلي الصرف ، على اساس من نظرية النسبية العامة ، قد اطلت الآن برأسها ، لاننا نستطيع ان نثق بأن « الحقل الحر » لفضاء منكوفسكي ، بخواصه المترية المنسجمة مع (١) ، يجب ان يستجيب لقوانين الحقل العامة . فقانون الحقل يستمد من هذه الحالة الخاصة بتعميم نظيف من اي اعتباط . وان التطوير اللاحق لهذه النظرية ، بواسطة نظرية النسبية العامة ، لم يحدث في اتجاه واحد ، فقد جرى ، في العقود الزمنية الاخيرة ، تجريب اتجاهات متنوعة . والهدف المشترك لهذه المحاولات كلها هو ادراك الحقيقة الفيزيائية كحقل هو ، فوق ذلك ، تعميم للحقل التثاقلي ، اي

---

(١) — ان التوبولوجيا علم يهتم بالمحاكمات الرياضية بمعزل عن اي مدلول محسوس . (المترجــم) .

بحيث يكون قانون الحقل تعميما للقانون الذي يصف الحقل التثاقلي الصرف . وبعد عملية سبر طويلة اعتقد انني وجدت الآن اكثر اشكال هذا التعميم معقولية(١) ، لكنني لست قادرا بعد على اكتشاف فيما اذا كان هذا القانون العام يمكن ان يصمد امام وقائع التجربة .

ان مسألة قانون الحقل الخاص مسألة ثانوية في الاعتبارات العامة السابقة، والمسألة الرئيسية اليوم هي : هل نظرية الحقل التي من النوع المشروح هنا يمكن ان توصلنا الى الهدف ؟ ونعني بذلك نظرية تقتصر على توصيف الحقيقة الفيزيائية ، بما فيها المكان الرباعي الابعاد ، بواسطة حقل . ان جيل الفيزيائيين الحالي يميل الى الجواب عن هذا السؤال بالنفي . فهم ، بموجب الشكل الحالي لنظرية الكم ، يعتقدون ان حالة الجملة المدروسة لا يمكن ان تتعين مباشرة ، بل بشكل غير مباشر فقط وبادخال مقولات احصائية بخصوص نتائج القياس الذي نجربه على الجملة المدروسة . ويسود الاعتقاد بأن المثنوية المؤكدة في الطبيعة (الجسيمية والموجبة) لا يمكن ان تتحقق الا باضعاف مفهوم الحقيقة. ولكنني اعتقد ان الوصول إلى هذا المدى من التخلي النظري ليس له اليوم ما يسوغه في معارفنا الفعلية ، وان على المرء أن لا يتراجع عن السير في طريق نظرية الحقل النسبوية حتى نهايته .



(١) ـ ان هذا التعميم يتميز بالطريقة التالية : ان الحقل التثاقلي للتوابع **gik** ، كما يشتق من « فضاء منكوفسكي » الخالي ، يتمتع بخاصة التناظر **gik** (**g21=g12** ، الخ). اما الحقل المعمم فهومن النوع نفسه ولكن بدون خاصة التناظر . اما استخراج قانون الحقل فيتم بصورة مشابهة تماما لحالة التثاقل الصرف الخاصة .

الفهـــرس

الموضـــــوع	الصفحة
تقديـــــم	٣
مقدمـــــة	٥

القســم الاول

نظريــة النسبية الخاصة	٧
١ ــ المعنى الفيزيائي للمقــولات الهندسية	٩
٢ ــ جملــة الاحداثيــات	١٣
٣ ــ المكان والزمان في الميكانيك التقليدي	١٦
٤ ــ جملــة الاحداثيات الغاليلية	١٨
٥ ــ مبدأ النسبية (بالمعنى المقصور)	١٩
٦ ــ جمع السرعات المستعمل في الميكانيك التقليدي	٢٢
٧ ــ التعارض الظاهر بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية	٢٣
٨ ــ حول فكرة الزمن في الفيزياء	٢٧
٩ ــ نسبيــة التزامن	٣١
١٠ــ نسبية مفهوم المسافــة	٣٥

الموضـــــوع	الصفحة
١١ـ تحويـل لورنتــز	٣٧
١٢ـ سلوك قضبان القياس والميقاتيات المتحركة	٤٣
١٣ـ جمع السرعات النسبوي (تجربة فيزو)	٤٧
١٤ـ القيمة النفعية لنظرية النسبية	٥١
١٥ـ النتائج العامــة للنظريــة	٥٣
١٦ـ التجربة ونظرية النسبية الخاصة	٥٧
١٧ـ فضاء منكوفسكي ذو الابعاد الاربعة	٦١
القسم الثانـي	
نظرية النسبية العامــة	٦٥
١٨ـ مبدأ النسبية الخاص والعام	٦٧
١٩ـ حقــل التثاقــل	٧١
٢٠ـ التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية كدليل على مسلمة النسبيـــة العامـــة	٧٥
٢١ـ ما هو السبب الذي يجعل اسس الميكانيك التقليدي ونظريـة النسبية الخاصة غير مرضيـة	٧٩
٢٢ـ بعض الاستنتاجات من مبدأ النسبية العامة	٨١
٢٣ـ سلوك الميقاتيات وقضبان القياس المربوطة بجسم مقارنة دوار	٨٥
٢٤ـ المتصل التقليدي والمتصل اللاتقليدي	٨٩

الموضـــــوع	الصفحة

٢٥ـ الاحداثيات الفوصيـــة ٩٣

٢٦ـ المتصل المكاني ــ الزماني في نظرية النسبية الخاصة على اعتبار انه متصل اقليدي ٩٧

٢٧ـ المتصل المكاني ــ الزماني لنظرية النسبية العامة ليس متصلا اقليديا ٩٩

٢٨ـ الصياغة السديدة لمبدأ النسبية العام ١٠٢

٢٩ـ حل مسألة التثاقل بالاستناد على مبدأ النسبية العام ١٠٥

القسم الثالـث

تأملات في العالم الكوني بمجمله ١٠٩

٣٠ـ مصاعب نظرية نيوتن في معرفة العالم الكوني ١١١

٣١ـ امكانية عالم (منته) و (لا محدود) معا ١١٣

٣٢ـ بنية المكان بموجب نظرية النسبية العامة ١١٧

الملحـــق (١)

طريقة بسيطة لاستنباط تحويل لورنتس ١١٩

الملحـــق (٢)

فضاء منكوفسكي ذو الابعاد الاربعة ١٢٥

الملحـــق (٣)

الاثبات التجريبي لنظريةالنسبية العامة ١٢٧

الموضـــــوع	الصفحة
الملحـــق (٤)	
بنية الفضاء بموجب نظرية النسبية العامة	١٣٧
الملحـــق (٥)	
النسبية ومسألة المكان	١٣٩

